

FSI VUT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

List 1

NETISKNOUT!

Titulní list

NETISKNOUT!

Zadání

**ABSTRAKT**

Předkládaná práce na téma „Integrita povrchu po řezání vodním paprskem“ se zabývá popisem problematiky progresivní nekonvenční technologie řezání hydroabrazivním paprskem, zkoumá integritu povrchu po řezání AWJ a rozebírá vybrané vlivy na výsledek řezného procesu. Zvláštní pozornost je pak věnována vyhodnocení integrity povrchu z hlediska jeho kvality. Následně je věnována pozornost faktorům vstupujících do procesu dělení a ovlivňujících topografii povrchu.

**Klíčová slova**

AWJ, technologie, řezání, povrch, faktory

**ABSTRACT**

This thesis on subject "Surface integrity after waterjet cutting process" describes problem of the progressive advanced technology, unconventional hydroabrasive jet cutting, examines the integrity of the surface after cutting AWJ and discusses selected factors on the outcome of the cutting process. Also, there are mentioned accompany effects of cutting process and the various applications of AWJ. A special attention is devoted to the surface integrity evaluation in terms of its quality. Next was attention to factors entering into the process of division and affecting the surface topography.

**Key words**

AWJ, technology, cutting, surface, factors

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

PEŠATA, Jan. *Integrita povrchu po řezání vodním paprskem: Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství, 2011. 45s. Vedoucí práce Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.

**Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Integrita povrchu po řezání vodním paprskem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Vlastnoruční podpis bakaláře

.....

Jméno a příjmení bakaláře

**Poděkování**

Děkuji tímto Ing. Jaromíru Dvořákovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

## OBSAH

<b>Abstrakt .....</b>	<b>3</b>
<b>Prohlášení.....</b>	<b>4</b>
<b>Poděkování.....</b>	<b>5</b>
<b>Obsah.....</b>	<b>6</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>7</b>
<b>1.Progresivní nekonvenční technologie dělení materiálů .....</b>	<b>8</b>
1.1.Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění .....	8
<b>2.Princip obrábění vodním paprskem .....</b>	<b>9</b>
2.1.Charakteristika obrábění AWJ .....	12
2.2.Vznik nástroje pro AWJ .....	13
2.2.1.Kapalina.....	13
2.2.2.Úprava a filtrace vody .....	13
2.2.3.Komprese .....	14
2.2.4.Rozvod vysokotlaké kapaliny.....	15
2.2.5.Vodní tryska.....	15
2.2.6.Generování abrazivního paprsku.....	16
2.2.7.Abrazivo.....	16
2.2.8.Abrazivní tryska .....	17
2.3.Působení nástroje.....	18
2.3.1.Šíření paprsku mezi tryskou a materiálem.....	18
2.3.2.Interakce s materiálem .....	18
2.3.3.Útlum paprsku .....	21
<b>3.Integrita povrchu obráběného AWJ technologií .....</b>	<b>22</b>
3.1.Hodnocení povrchu.....	22
3.2.Parametry profilu povrchu.....	23
3.2.1.Drsnost povrchu .....	25
3.2.2.Odchylka kolmosti a deviace řezné stopy.....	28
3.3.Chyby topografie po dělení AWJ a kvalita řezné spáry.....	30
3.3.1.Povrchové kazy na materiálu.....	32
3.4.Trendy vedoucí k lepší kvalitě povrchu .....	32
3.5.Metody hodnocení povrchu .....	33
3.5.1.Mechanická metoda .....	34
3.5.2.Optické metody.....	35
3.5.3.Ostatní metody .....	35
<b>4.Technologické faktory .....</b>	<b>36</b>
4.1.Přímé faktory dělení.....	38
4.2.Hydraulické faktory .....	40
4.3.Směšovací faktory .....	40
4.3.Abrazivní faktory .....	41
Závěr .....	42
Seznam použitých zdrojů.....	43
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	45

## ÚVOD

Tato práce se zabývá studiem nekonvenční technologie řezání vodním paprskem se zaměřením na oblast integrity povrchu vytvořeného AWJ technologií a rozbořem vlivu vybraných parametrů na výsledek řezného procesu.

Nekonvenční metody obrábění se používají v důsledku vývoje nových konstrukčních materiálů, které mají vysokou pevnost, tvrdost a houževnatost. Navíc může být obrábění určitých materiálů tradičními konvenčními metodami technologicky složité, nevýhodé nebo neekonomické. Nekonvenční metody využívají především energetického úběru materiálu použitím čistě chemické, elektrochemické nebo tepelné reakce. Do nekonvenčních metod lze také zařadit řezání vodním paprskem.

Metoda řezání vysokotlakým vodním paprskem je moderní přesnou technologií, kterou se můžeme použít pro dělení měkkých materiálu jako jsou (papír, plasty a jiné), ale také pro materiály, které jsou jinými metodami těžko obrobitelné jako keramika nebo kompozitní materiály. Tato technologie byla vyvíjena od přelomu sedmdesátých a osmdesátých let. Od té doby se tato výrobní technologie prudce rozrůstá a dnes je zavedená téměř ve všech výrobních odvětvích. Navíc přidáním jemného brusiva do vodního paprsku se značně zvýší účinnost dělení. Vysoká rychlost vytékajícího proudu vody s příměsí abraziva umožňuje obrábět intenzivně, ekonomicky a přitom ekologicky. Jde tedy o velmi aktuální technologii právě pro její univerzálnost, ekologičnost a bezpečnost.

Do procesu hydroabrazivního dělení zasahuje také celá řada faktorů, které ovlivňují nejen výslednou kvalitu povrchu dělicích stěn, ale také celkovou efektivitu úběru materiálu dělicího procesu. Faktory ovlivňující řezný proces obecně dělíme na přímé a nepřímé. Přímé faktory generují topografii plochy řezu. Nepřímé faktory ovlivňují především kvalitu a energetickou účinnost výchozího nástroje.

## 1. Progresivní nekonvenční technologie dělení materiálů

Dělení materiálů patří mezi základní technologické operace obrábění. Rozdělujeme je mezi *konvenční* a *nekonvenční*. Mezi nejpoužívanější konvenční procesy dělení materiálů můžeme zahrnout rozřezávání (rozbrušovacím kotoučem, pilovým lisem), stříhání, lámání a další. U nekonvenčních metod obrábění se nepoužívá standardní řezný nástroj, u kterého můžeme definovat pracovní části nebo nástrojové úhly a při obrábění se netvoří tříska jako u standardních metod obrábění (soustružení, frézování, vrtání atd.), protože u progresivních technologií dochází především k mechanickým, elektrickým, tepelným a chemickým procesům, které se využívají k úběru materiálu. Nekonvenční metody obrábění se používají v důsledku vývoje a používání nových konstrukčních materiálů s vysokou pevností, tvrdostí a houževnatostí, které nelze standardními metodami hospodárně obrábět (titanové slitiny, keramika, superslitiny, slinuté karbidy, plastické hmoty, silikony atd.). (1,8,9)

### 1.1. Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění

Nekonvenční metody obrábění lze dělit z různých hledisek, ale nejvíce užívané a nejrozšířenější dělení nekonvenčních metod je z hlediska hlavního energetického úběru materiálu. Z tohoto hlediska je možné metody rozdělit do následujících hledisek:

- elektrochemické a elektrické,
- chemické,
- tepelné a elektrotepelné,
- mechanické. (1,8)

Mezi elektrochemické a elektrické metody patří procesy, které využívají elektrolýzu, jako třeba elektrochemické obrábění nebo broušení (ECM, ECG). K chemickým metodám patří chemické nebo fotochemické leptání (CM, PCM). Do skupiny metod tepelných a elektrotepelných patří obrábění laserem (LBC), plazmou (PAM), elektrojiskrové obrábění (EDM), nebo také svazkem elektronů (EBM). A nakonec mezi mechanické metody obrábění patří například obrábění ultrazvukem (USM) a obrábění hydrodynamickým a hydroabrazivním paprskem (WJM, AWJ). Zde je sepsán pouze stručný výčet metod, kterých je ve skutečnosti mnohem více. (1,9)



## 2. Princip obrábění vodním paprskem

Obrábění vodním paprskem nebo také hydrodynamické obrábění využívá mechanicko – fyzikální podstatu úběru materiálu. Jako řezný nástroj je použit paprsek vody o velké rychlosti (  $600 - 900 \text{ m s}^{-1}$  ) a pracovního tlaku (400 – 690 MPa v závislosti na strojním zařízení), který protéká tryskou malého průměru a tím získává velmi vysokou kinetickou energii. Čistý vodní paprsek je nejlépe využitelný na řezání nekovových materiálů jako (plasty, dřevo, papír, textil atd.).

V případě, že do vodního paprsku je přidán abrazivní materiál, tak se mechanický účinek při řezání znásobuje a tudíž je možné tuto metodu použít i pro řezání velmi tvrdých a houževnatých materiálů jako (slitiny, sklo, železné i neželezné kovy).

Hydroabrazivní paprsek odebírá materiál vysokorychlostním erozivním procesem, v důsledku použití abrazivních částic v toku usměrněného do úzkého paprsku. Pracovní tlak je u hydroabrazivního obrábění nižší než u čistého vodního paprsku (60 – 400 Mpa). (2,6)

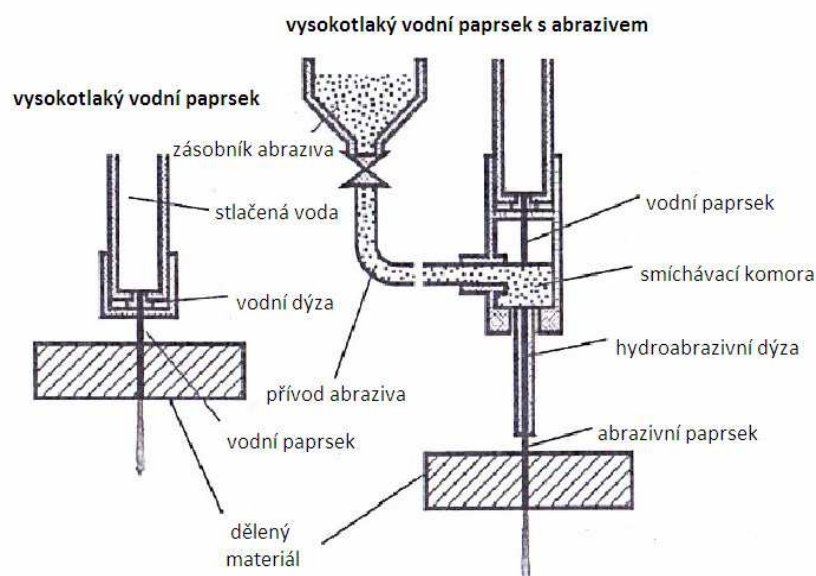
### Rozdělení kapalinových paprsků



Obr.2.1. Rozdělení kapalinových paprsků (4)

V praxi používáme k dělení materiálu především 2 typy řezání, která z hlediska použití pracovního média dělíme na:

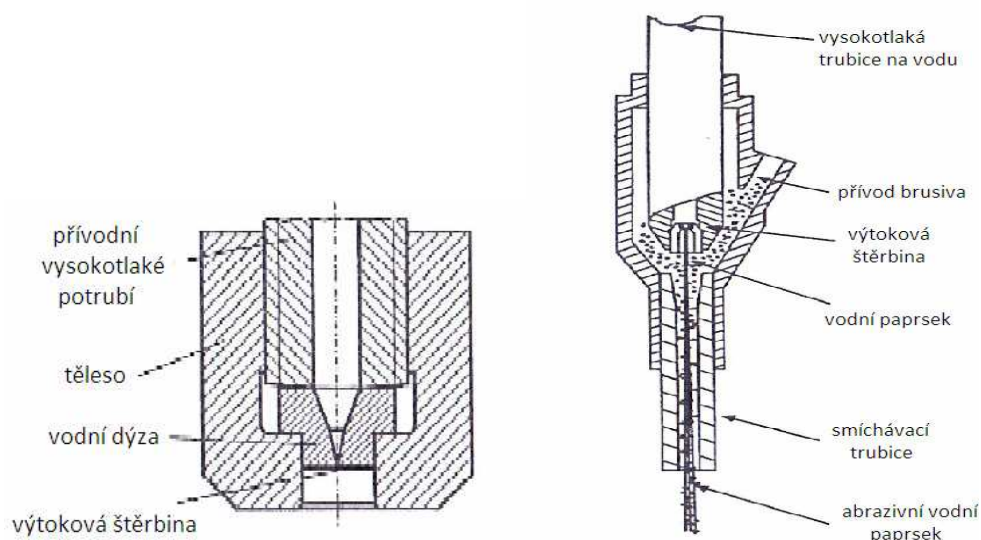
- WJM – Water Jet Machining (obrábění vodním paprskem nebo také hydrodynamické obrábění),
- AWJ – Abrasive Water Jet Machining (obrábění vodním paprskem s příměsí abraziva nebo také hydroabrazivní obrábění). (2)



Obr. 2.1 Zjednodušený model technologie WJM a AWJ (1)

V dnešní době je technologie řezání vodním paprskem zavedená téměř do všech průmyslných odvětví, kde má řadu aplikací pro použití. (17)

Rozdíl v zařízení pro hydrodynamické a hydroabrazivní řezání je v konstrukci vodní dýzy. Pro AWJ je dýza navržena tak, aby přes různé mechanismy bylo přidáno jemné brusivo do proudu vody. (1)



Obr.2.4 Příklad konstrukce dýzy pro WJM a AWJ. (1)

**Výhody technologie řezání vodním paprskem:**

- vysoká rychlost řezání a energetická účinnost,
- v místě úběru částic není materiál tepelně ovlivněný,
- studený řez umožňuje řezat materiály citlivé na teplo,
- minimální deformační napětí,
- úzký řez i u materiálů větších tloušťek lze klást dílce vedle sebe, což přináší úsporu materiálu,
- v kvalitnějším řezu většinou již není nutné žádné další opracování,
- proces je bezprašný a nevznikají žádné plyny nebo páry,
- tvarové omezení řezu je dáno pouze kruhovitým průřezem paprsku je tedy možno řezat i velice detailní kontury,
- zařízení je flexibilní,
- jakost obrobené plochy je dobrá i při více násobných řezech,
- úběr materiálu závisí na mechanických vlastnostech materiálu (tvrdosti, pevnosti apod.) jen minimálně,
- při řezu se neporuší ani případná povrchová úprava jako leštění broušení a jiné,
- minimální silové působení paprsku na dělený materiál tedy nedochází ke vzniku mikrotrhlin,
- možnost řezu jakýchkoli materiálů včetně kovů a slitin i kalených či jinak modifikovaných, těžko opracovatelné materiály (sklolamináty, sklo, gumotextil), pryže, plasty apod.(2,6,8)

**Nevýhody technologie řezání vodním paprskem:**

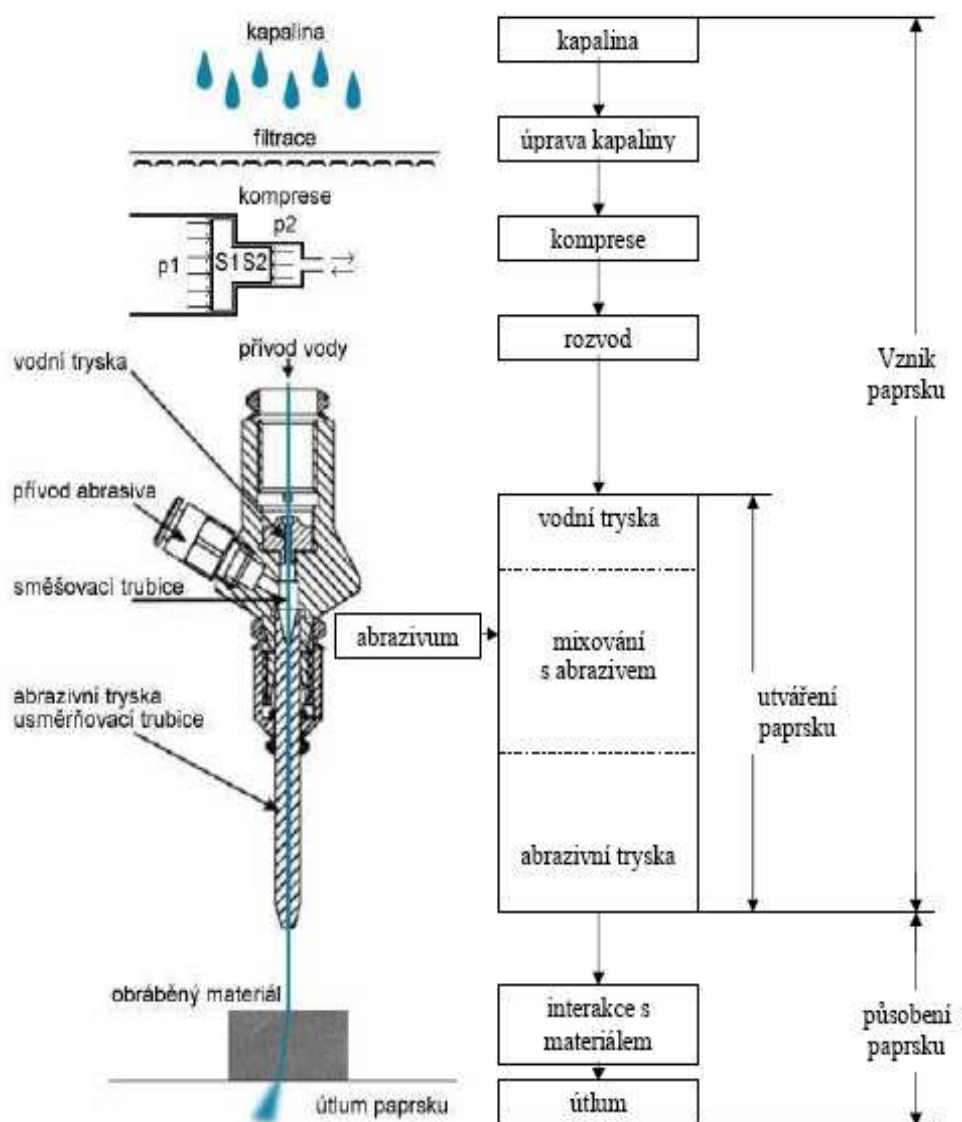
- kontakt s vodou a při AWJ i s abrazivním materiálem (nutnost ošetření ploch kvůli povrchové korozi u nasákavých materiálů delší doba vysoušení, možná změna barvy, znečištění apod.),
- při horších kvalitativních stupních řezu u silnějších materiálů dochází k výběhu paprsku (deformaci kontury řezu ve spodní hraně materiálu),
- vysoká hlučnost,
- omezená možnost výroby malých dílců – možno řešit můstky.(2,6)



Obr.2.2 Použití můstků při řezání drobných dílců z nerezí tl. 9 [mm] (6)

## 2.1. Charakteristika technologie AWJ

Na schematicém Obr.2.5 jsou vyznačeny hlavní oblasti vzniku, utváření a působení nástroje na obráběný materiál. (5)



Obr.2.5 Schéma vzniku utváření a působení nástroje (5)

## 2.2. Vznik nástroje pro AWJ

### 2.2.1. Kapalina

Efektivnost technologie AWJ je závislá na správném výběru druhu pracovní kapaliny. Tato kapalina musí splňovat následující předpoklady:

- nízká viskozita (ta zabezpečí malé ztráty výkonu toku kapaliny při průchodu hadicemi, potrubím apod.),
- dobrou přístupnost a nízkou cenu,
- minimální ovlivnění koroze (platí pro kovové části zařízení),
- schopnost zabezpečit nejlepší jakost obrábění při nejmenších energetických ztrátách na formování paprsku. (9)

Právě tyto uvedené požadavky nejlépe splňuje voda, která je nejdostupnější, nejlevnější a je ekologická. Přitom ale její kvalita a vlastnosti velmi ovlivňují životnost vodní trysky a součástek multiplikátoru a proto by přivedená voda měla splňovat požadavky dané normou, aby nedocházelo k zanášení řezací hlavice. Pokud tedy voda tyto normy nesplňuje, je třeba podrobit ji nezbytným úpravám, aby byla vyhovující. Voda by měla splňovat zejména tyto požadavky:

- kyselost PH v rozmezí 6-8,
- nízká tvrdost vody (nízký obsah rozpuštěných pevných částic jako např. Ca, CaO, Mg, MgO, Fe, Mn, Si a další). (4,17)

### 2.2.2. Úprava a filtrace kapaliny

V kapalině jsou přítomny pevné částice, které urychlují opotřebení zařízení (stěny trubek nebo válců), ucpávají ventily nebo v kontaktu s těsněním omezují jeho správnou funkci a proto je správná filtrace kapaliny důležitá pro bezproblémový chod zařízení. Způsob úpravy vody je závislý od kvality používané vody. Voda je nejprve filtrována pomocí filtrů vyrobených z bavlny nebo syntetických vláken. Tyto filtry zabrání průstupu nečistot až do velikosti 0,5  $\mu\text{m}$ . Pokud i po filtraci je obsah rozpuštěných pevných látek příliš vysoký, následují další procesy úprav vody jako je změkčování nebo deionizace vody. (1,4,9)



Obr.2.6 Vodní filtry (7)



### 2.2.3. Komprese

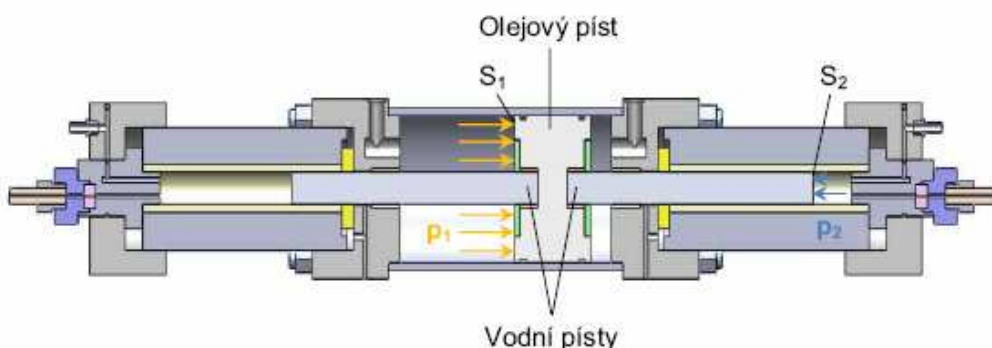
„Pro vytvoření paprsku s vysokou řeznou účinností je zapotřebí tlak přiváděné vody několikanásobně zvýšit a zajistit jeho plynulé nepřetržité generování. K tomuto účelu slouží buď zařízení s triplexovým plunžrem, nebo multiplikační jednotka, zkráceně multiplikátor.“(4)

Plunžrová čerpadla – jsou vývojově starší. Dříve se používaly převážně k odstraňování nečistot a starých nátěrů z různých povrchů, k sanaci betonových konstrukcí atd. Pracovní tlak kapaliny nepřevyšoval 200 MPa, ale v současnosti plunžrová čerpadla dosahují pracovního tlaku až 350 MPa, což umožňuje jejich použití také pro dělení materiálů. (4,9)



Obr.2.7 Plunžrové čerpadlo (4)

Multiplikátorová čerpadla – tato čerpadla byla vyvinuta speciálně pro účely řezání a vyvíjí tlak kapaliny 300 – 700 MPa. Využívají tzv. multiplikátor což je zařízení ke znásobení tlaku. Činnost zařízení je založena na rovnováze sil působících na odlišně velké plochy diferenciálního pístu. Zesílení tlaku je dáno poměrem ploch dvou spojených pístů v hydraulickém okruhu. (4,9)



Obr.2.8 Multiplikátor (4)

#### 2.2.4. Rozvod vysokotlaké kapaliny

„Stlačená kapalina je přivedena přes vysokotlaké potrubí do pohybujícího se zařízení řezné hlavy.“ (9). K výrobě potrubí a armatur pro rozvod vysokotlaké kapaliny se používají nejčastěji vysokopevné nerezové materiály. Konstrukce potrubí je přizpůsobeno pohybům řezací hlavy. (1,9)

#### 2.2.5. Vodní tryska

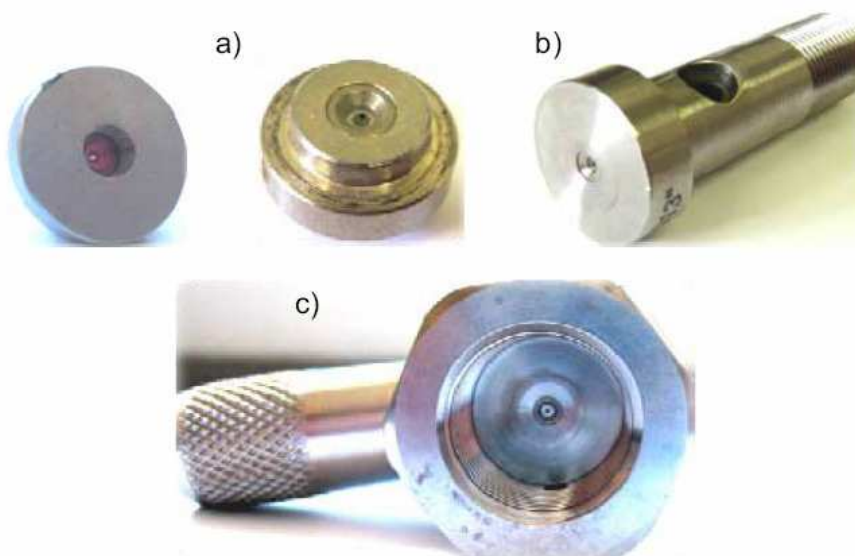
Vodní tryska je umístěna na vstupu do řezací hlavy. Tato tryska vytváří a formuje vodní paprsek a současně zvyšuje výtokovou rychlost proudící kapaliny. Při průchodu kapaliny vodní tryskou dochází k přeměně potenciální energie kapaliny na dynamickou (kinetickou) energii vodního paprsku. Kvalita a způsob této transformace mají zásadní vliv na celkovou účinnost nástroje. Úroveň přeměny potenciální energie na kinetickou závisí především na kvalitě opracování dýzy vodní trysky a její životnosti.

Vodní trysky se využívají pro oba typy řezných hlavic tedy jak pro dělení hydrodynamickým paprskem tak pro hydroabrazivní dělení materiálů.

Materiál ze kterého jsou trysky vyrobeny je rozdílný a proto závisí na požadovaném tlaku. Pro nižší pracovní tlaky asi do 150 MPa se používají trysky kovové, po případě ze slinutých karbidů. Trysky pro tlaky do 250 MPa z keramiky a pro vyšší pracovní tlaky nad 250 MPa potom ze safíru rubínu nebo polykrystalického diamantu, ale jde pouze o malý „korálek“ materiálu vetknutý do pouzdra, vyměnitelné vložky nebo přímo do těla řezací hlavy.

Trysky se vyrábějí v různých průměrech, tedy lze použít vhodnou trysku s využitím různé energie proudu a tedy můžeme z jednoho tlakového zdroje napájet současně více trysek.

Životnost vodní trysky především závisí na druhu materiálu ze kterého je tryska vyrobena, na kvalitě vody proudící tryskou a na pracovním tlaku kapaliny. (1,4,9)



Obr.2.9 a) safírová a diamantová vodní tryska v montážním lůžku, b) diamantová tryska ve vyměnitelné vložce, c) diamantová tryska vetknutá v těle řezací hlavy. (4)

### 2.2.6. Generování abrazivního paprsku

Mísení abraziva s čistým vodním paprskem je složitý proces, který probíhá v tzv. směšovací komoře, umístěné uvnitř řezací hlavy a pokračuje v abrazivní trysce. Směšovací komora má svůj specifický tvar i velikost. Kapalinový paprsek do ní vstupuje rychlostí řádově stovek  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a v komoře dochází k podtlaku, kterým je přisáváno spolu se vzduchem abrazivo ze zásobníku do komory, kde dojde ke smísení s čistým paprskem. Abrazivní částice jsou vlivem předávání kinetické energie čistého paprsku urychlovány a po průchodu do tzv. zaostřovací trubice vytvářejí abrazivní kapalinový paprsek. (9)

### 2.2.7. Abrazivo

Bez použití abraziva by nebylo možné řezat tvrdší materiály, protože částičky abraziva přimísené do vodního paprsku zvyšují jeho mechanický účinek. (1)



Obr.2.10 Koncentrát připravený z granátu almanidu (3)

Výběr správného abraziva je velmi důležitý, jelikož náklady na něj jsou největší položkou při dělení AWJ. Při výběru vhodného druhu abraziva musíme nejprve zvážit některé faktory a to zejména:

- Cena abraziva – náklady na abrazivo představují značnou část celkových provozních nákladů.
- Tvrdost abraziva - je dána jeho chemickým složením a mechanicko – fyzikálními vlastnostmi. Tvrdší abraziva mají vyšší účinnost při dělení materiálů, ale způsobují rychlejší opotřebení hydroabrazivní trubice.

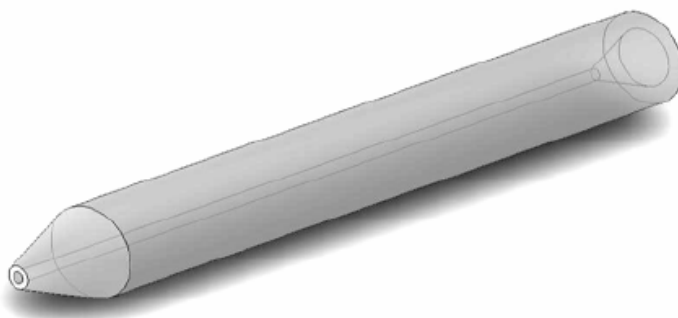


- Velikost abrazivních zrn – při řezání s většími částicemi dochází ke zhoršení jakosti povrchu, ale zkrátí se čas potřebný k prořezání materiálu.
- Tvar abrazivních zrn – ovlivňuje jakost obrobeného povrchu i dosahovanou hloubku řezu. Zrna se vyznačují svou kruhovitostí a kulatostí. Kulatějšími zrny docílíme menší drsnost povrchu na úkor hloubky řezu.
- Hmotnostní tok abraziva – se zvyšujícím se hmotnostním tokem se zvyšuje kinetická energie paprsku a tudíž i dosahovaná hloubka řezu. Při překročení kritického hmotnostního toku abraziva dosahovaná hloubka řezu klesá a může dojít i k ucpání hydroabrazivní trubice.
- Ekologičnost abraziva – užívaná abraziva by měla splňovat požadavky zdravotní a ekologické nezávadnosti.
- Recyklovatelnost – možnost opětovného využití abraziva (jeho části), které již bylo používáno. (1,3,8,9)

Abraziva, která nejlépe splňují tyto faktory se v praxi nejčastěji používají a ve větších výroбах se také recyklují. Jedná se převážně o granátová abraziva a olivínové písky. (8)

#### 2.2.8. Abrazivní tryska

Zaostřovací trubicí prochází hydroabrazivní paprsek do místa dělicího řezu. Při průchodu trubicí se vytváří koherentní vodní paprsek, který tvoří směs kapaliny, vzduchu a abrazivních částic. Vlastnosti vystupujícího abrazivního paprsku určují průměr a délka zaostřovací trubice. (4,9)



Obr.2.11 Abrazivní tryska (4)

Základním požadavkem při výrobě abrazivní trysky je vysoká míra otěruvzdornosti. Trubice jsou vyráběny práškovou metalurgií a liší se délkou, vnitřním i vnějším průměrem a materiálem. I přes velkou materiálovou odolnost trubice postupem času dochází vlivem směsi vody, vzduchu a abraziva k jejímu opotřebení. To se projevuje nesoudržností vystupujícího paprsku. (9)

Tab.2.1 Životnost abrazivních trysek (9)

Materiál	Životnost	Popis
Standardní karbid wolframu	4-6	Nízká výkonnost a poměr cena/hodina. Mají tendenci k mimosovému opotřebení. Požadují velmi častou výměnu.
Levný kompozitní karbid	35-60	Vhodné pro hrubé dělení materiálů.
Střední životnost kompozitní karbid	80-90	Vhodné pro všechny druhy aplikací dělení materiálů.
Premium kompozitní karbid	100-150	Nejlepší vlastnosti, vykazuje předvídatelné osově opotřebení. Vhodné pro přesné řízení i každodenní práce.

## 2.3. Působení nástroje

### 2.3.1. Šíření paprsku mezi tryskou a materiálem

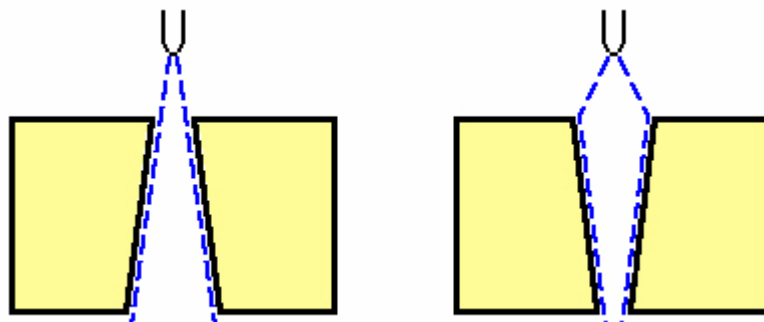
Ihned po výstupu paprsku ze zaostřovací (hydroabrazivní) trubice abrazivní paprsek ztrácí svou kinetickou energii v důsledku kontaktu s okolním vzduchem. Paprsek se částečně rozděluje na vnitřní jádro a vnější obal. Jádro paprsku si zachovává svou koherenci téměř až do kontaktu s materiálem, ale vnější obal ztrácí svou rychlost a oddělují se od něj jednotlivé kapky vody a částičky abraziva a vychylují se z původního směru v závislosti na výtokové rychlosti paprsku. Toto vychýlení může narušovat vrchní řezné hrany obrobku a z toho důvodu se neustále vyvíjí snaha minimalizovat vzdálenost mezi výstupem paprsku ze zaostřovací trubice a děleným materiálem. (9,10)

### 2.3.2. Interakce s materiálem

Technologie dělení materiálu hydroabrazivním paprskem je erozivní proces. Zahrnuje 2 různé mechanismy eroze v závislosti na vlastnostech materiálu jestli je křehký nebo tvárný. Křehká eroze se popisuje jako lámání. Materiál je odebírán tvorbou, množením a protínáním prasklin, které vznikají okolo abrazivních částic. Tvárná eroze se definuje jako proces řezání. Částice materiálu jsou postupně odřezávány nebo odlupovány zrnkami abraziva. Ve skutečnosti je řezání AWJ technologií kombinací těchto dvou mechanismů opotřebení jen nepůsobí jednotlivě, ale v různých kombinacích.

Výsledkem působení těchto mechanismů vzniká řezná spára, jejíž tvar, geometrie a velikost závisí na vstupních hodnotách parametrů. Na výsledný tvar a velikost řezné spáry mají především vliv posunová rychlost a vzdálenost hydroabrazivní trubice od obrobku. Při nižších posuvech dochází

k vychylování abrazivních částic z přímého směru dopadu a ty pak naráží do děleného materiálu mimo hlavní oblast směru a tím rozšiřují spáru do tvaru kužele. Při zvýšení rychlosti posuvu se naopak dochází k rozšíření řezné spáry do tvaru „V“ z důvodu, že paprsek nesetrvává dostatečně dlouho na jednom místě. (4,9,23,25)

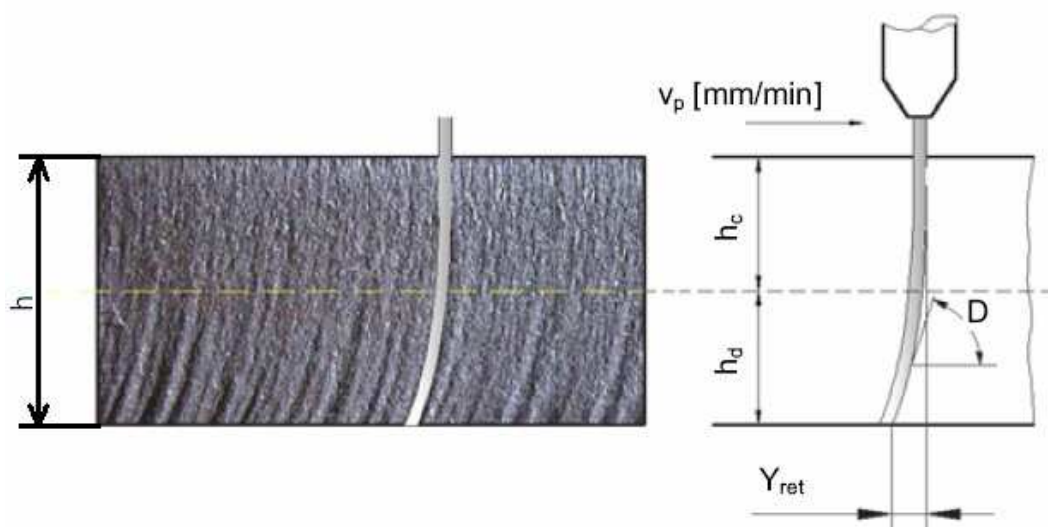


Obr.2.12 Řezné spáry (5)

Na výslednou deformaci obrobeného povrchu má vliv:

- velikost a tvar abrazivních částic,
- pohybová (kinetická) energie abrazivních částic,
- úhel dopadu abrazivních částic,
- vlastnosti materiálu abrazivních částic,
- vlastnosti obráběného materiálu. (9)

Na povrchu dělicích stěn řezné spáry vzniká v důsledku působení těchto mechanismů povrch, který můžeme rozdělit do dvou charakteristických částí. Horní část dělicího řezu, kterou určujeme jako *hladkou zónu* a spodní část *rýhovanou zónu*. Rýhování ve spodní části obrobku je způsobeno ztrátou kinetické energie paprsku a jeho vychylováním. (1,9,11)



Obr.2.13 Povrch obrobený hydroabrazivním paprskem s vyznačením horní hladké zóny - ( $h_c$ ), spodní rýhované zóny - ( $h_d$ ), velikosti váznutí (retardace) paprsku -  $Y_{ret}$  a deviačního úhlu -  $D$ . (4)

Dle Hashishe je možné pomocí empirických vztahů spočítat tyto zóny, ale mnoho veličin je buď obtížné, nebo nemožné je určit. Ve vzorcích také nejsou obsaženy všechny procesní vlivy řezání, tudíž vypočtená hodnota se může značně lišit od skutečné. (5)

Vztah pro velikost horní hladké části –  $h_c$  (5)

$$h_c = \frac{\frac{V_a}{C_k} d_a}{\left( \frac{\pi \rho_p v_p d_a^2}{14 m_a} \right)^{\frac{2}{5}} + \frac{v_e}{C_k}} \quad (2.1)$$

Kde je :  $v_a$  - rychlost pohybu abrazivních částic [ $m \cdot s^{-1}$ ],  
 $C_k$  - koeficient charakteristické rychlosti [1],  
 $d_a$  - průměr hydroabrazivní trubice [m],  
 $\rho_p$  - hustota abrazivního materiálu [ $kg \cdot m^{-3}$ ],  
 $v_p$  - rychlost posuvu řezné hlavy [ $m \cdot s^{-1}$ ],  
 $m_a$  - hmotnostní tok abraziva [ $kg \cdot s^{-1}$ ],  
 $v_e$  - kritická rychlost abrazivních částic [ $m \cdot s^{-1}$ ].

Vztah pro velikost spodní rýhované části -  $h_d$  (5)

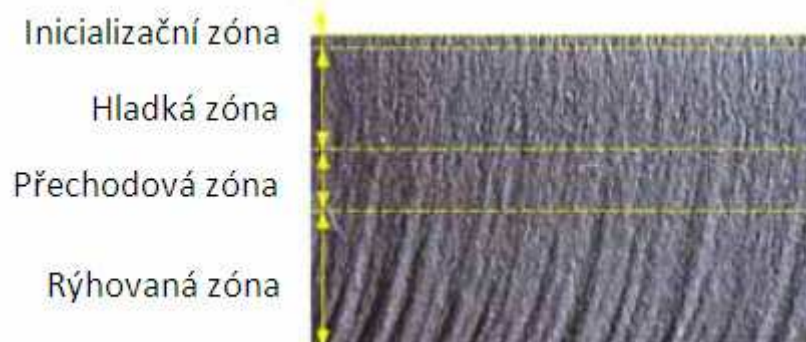
$$h_d = \frac{1}{\frac{\pi d_a \sigma_{kl} v_p}{2 C_1 m_a (v_a - v_e)^2} + \frac{C_f}{d_a} \frac{v_a}{(v_a - v_e)}} \quad (2.2)$$

kde je:  $\sigma_{kl}$  - mez kluzu řezaného materiálu [Mpa],  
 $C_1$  - koeficient druhu řezaného materiálu [1],  
 $C_f$  - koeficient odporu stěny materiálu [1].

Celková délka dělicího řezu  $h$  lze stanovit sečtením jednotlivých velikostí spočtených zón.

$$h = h_c + h_d \quad (2.3)$$

Vzhledem k neustálému výzkumu a vývoji hydroabrazivního dělení materiálů došlo v posledních letech k vyčlenění nejvrchnější části hladké zóny v samostatnou oblast – *inicializační zónu*. Dochází v ní k prvnímu kontaktu hydroabrazivního paprsku s materiálem a její tvar a geometrie ovlivňuje další šíření paprsku s obrobkem. V inicializační zóně dochází k řeznému opotřebení při malých stykových úhlech, zatím co v hladké zóně při velkých stykových úhlech. Přerozdělením hladké a rýhované oblasti získáme další – *přechodovou zónu*. V přechodové zóně dochází ke změně z řezného opotřebení na deformační. V dnešní době tedy dělíme povrch vytvořený hydroabrazivním paprskem na 4 odlišné zóny. (4,9)



Obr.2.14 Vyznačení Inicializační, Hladké, Přejížděvací a Rýhované zóny. (4)

### 2.3.3. Útlum paprsku

Útlum paprsku probíhá v lapači vody a odpadu. Jedná se o nádrž, která je naplněná vodou, má stanovenou minimální výšku hladiny a není spojena s konstrukcí stolu. Výška vody je stanovena od maximálního pracovního tlaku zařízení. (1,9)



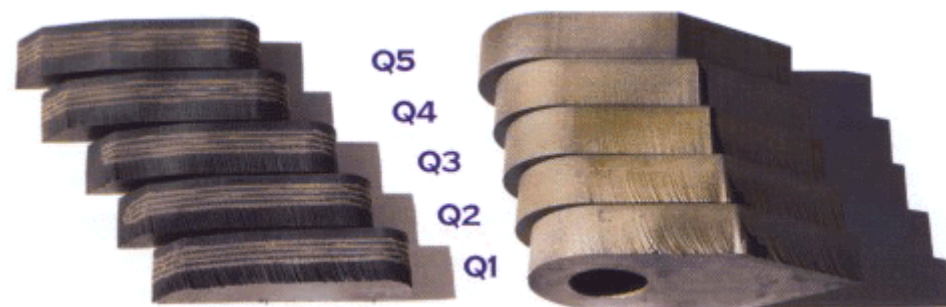
Obr.2.15 Kompaktní stůl s lapačem vody firmy PTV s.r.o. (7)

### 3. Integrita povrchu obráběného AWJ technologií

#### 3.1. Hodnocení povrchu

Zkoumání integrity povrchu je velmi významné, jelikož v současné době jsou kladeny vysoké požadavky na jakost povrchu.

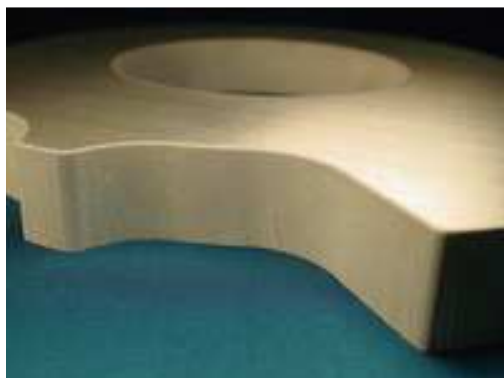
Normy pro hodnocení topografie povrchu doposud nebyly zavedeny ani sestaveny. Všeobecně se již řadu let uznává rozdělení dosahovaných kvalit řezu do hodnot Q1 až Q5. Přičemž hodnota Q1 je definována jako nejhorší a Q5 jako nejlepší. (5,9)



Obr.3.1 Příklady řezu (6)

Většina firem toto značení používá, ale přece jen se u nich stupně kvality trochu liší a to především ze dvou důvodů:

- Nikde není definován rozsah ani specifikace jednotlivých parametrů přesnosti a drsnosti povrchu, a tak si každá společnost určuje vlastní dle svých normativů a provedených zkoušek.
- Společnosti se svým zařízením dodávají také vlastní software, který vypočítává jednotlivé stupně kvality. Určující parametry, které vstupují do řezného procesu mají vliv na kvalitu řezu. (4,5)



Obr.3.2 příklad řezu kvalitativního stupně Q4 (vlevo) a Q2 (vpravo) (6)

Tab 3.1. Popis stupňů kvality řezu popsany firmou CHPS s.r.o. (6)

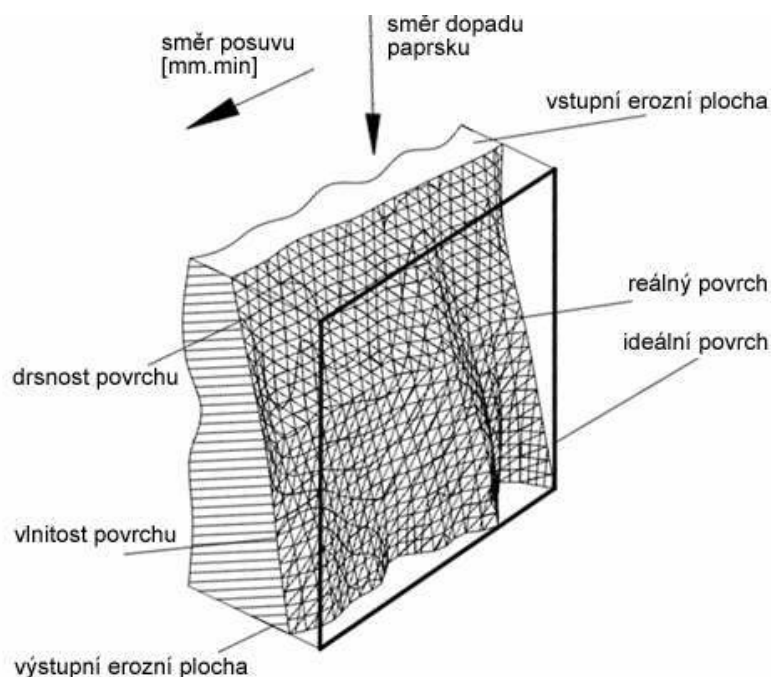
Kvalitativní stupeň	Popis	Drsnost $R_a$ v horní kontuře	Drsnost $R_a$ ve spodní kontuře	Tvarová přesnost [mm] v horní kontuře	Tvarová přesnost [mm] ve spodní kontuře	Úkos
Q5	Nejlepší řez	pod 3,2	pod 3,2	+/- 0,1	+/- 0,1	Většinou mírný podřez
Q4	Kvalitní řez	pod 3,2	cca 6,3	+/- 0,1	+/- 0,2	Většinou minimální
Q3	Střední řez	cca 4,0	do 12,5	+/- 0,15	Dle typu a síly materiálu	Dle typu a síly materiálu
Q2	Hrubí řez	cca 4,0	do 25	+/- 0,2	Dle typu a síly materiálu	Dle typu a síly materiálu
Q1	Dělicí řez	4,0-6,3	do 40	+/- 0,2	Výrazně nepřesné	Výrazný úkos do +

### 3.2. Parametry profilu povrchu

„Povrchy vytvořené AWJ technologií jsou kvalitativně odlišné od povrchu vytvořených konvenčními metodami. Z geometrického hlediska jde o hrubší a členitější topografii. Jakost povrchu vytvořeným AWJ se obecně zhoršuje s rostoucí vzdáleností od místa vstupu paprsku do materiálu.“(5) Hlavní geometrické parametry dělicí stěny jsou následující:

- drsnost povrchu  $R_a$ ,
- zpoždění (retardace) dělicí řezné stopy  $Y_{ret}$ ,
- úhel zakřivení (deviace) dělicí stopy  $\delta$ ,
- hloubka dělicího řezu  $h$ . (9)



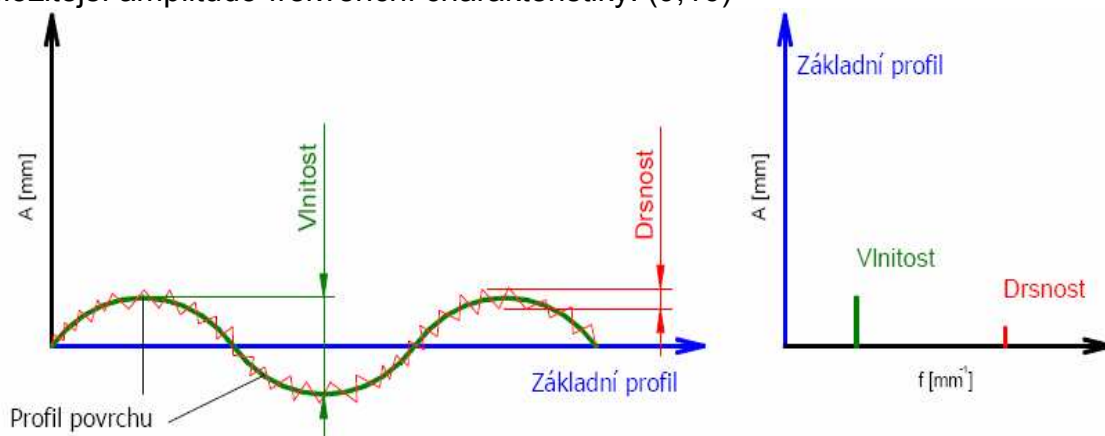


Obr.3.3 Model povrchu vytvořeného AWJ technologií (5)

Parametry profilu povrchu rozlišujeme podle normy ČSN EN ISO 4277 na:

- základní profil povrchu P
- profil vlnitost povrchu W
- profil drsnosti povrchu R

Jako základní profil povrchu považujeme ideálně hladký povrch. Na obrázku 3.4. můžeme vidět, že profil vlnitosti má nízkou frekvenci avšak vysokou amplitudu nerovnosti povrchu. U profilu drsnosti povrchu je tomu právě naopak a tedy má vysokou frekvenci a nízkou amplitudu nerovnosti povrchu. Tyto charakteristiky jsou znázorněny na obr. 3.4. avšak jedná se pouze o modelové situace, jelikož skutečné případy povrchů mají výrazně složitější amplitudo-frekvenční charakteristiky. (9,16)



Obr.3.4 Výškové fluktuace profilu povrchu vlevo a jeho amplitudo-frekvenční spektrum vpravo (16)



### 3.2.1 Drsnost povrchu

Vysokorychlostní vodní paprsek s příměsí abrazivních částic vytváří na povrchu obrobku reliéf, který je popsán v kapitole 2.4.2. Tento reliéf z hlediska posuzování parametru profilu drsnosti  $R_a$  dělíme do několika zón viz. Kapitola 2.4.2. (17)

Drsnost povrchu patří mezi hlavní geometrické parametry topografie hydroabrazivně dělených povrchů, mění se v závislosti na řezných parametrech při obrábění. „Drsnost povrchu se při řezání AWJ mění lineárně se zvyšováním hloubky řezu. Zároveň se snižující se rychlostí posuvu se zvětšuje oblast hladké zóny (charakteristická nižšími hodnotami drsnosti) a vyskytuje se i ve větších hloubkách obrobeného povrchu. Avšak v každém případě se zvětšující se hloubkou obrobku se vyskytují zóny s vyšší drsností.“ (5) Nejvýraznější vliv na drsnost obrobené plochy je přisuzován velikosti rychlosti posuvu, a však i po změně tlaku vodního paprsku můžeme sledovat lineární průběh drsnosti povrchu. Zvyšováním tlaku vody se také snižuje vlnitost obráběného povrchu a vyšší pracovní tlak urychluje úběr materiálu a vytváří hladší povrch materiálu.

Použití abrazivního materiálu má velký vliv na drsnost povrchu. Pro jemné opracování materiálu je vhodná malá zrnitost abraziva a pro hrubší opracování a větší úběr materiálu naopak větší.

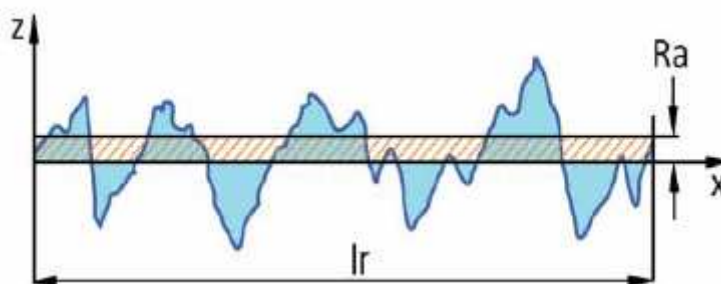
Mezi nejpoužívanější normované parametry pro hodnocení drsnosti povrchu obráběného AWJ technologií jsou: (5,9)

#### Průměrná aritmetická odchylka profilu $R_a$

Jedná se výškovou charakteristiku drsnosti povrchu. „Je jednou z nejpoužívanějších charakteristik drsnosti povrchu ve strojírenské praxi.“ (4) Je to střední aritmetická hodnota absolutních odchylek profilu v rozsahu základní délky a je definována vztahem:

$$R_a = \frac{l}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (3.1)$$

kde je:  $l_r$  - měřená délka [m],  
 $Z(x)$  - funkce popisující profil [1]. (9)



Obr.3.5 Průměrná aritmetická odchylka  $R_a$  (4)

Parametr  $R_a$  je pouze statistickou hodnotou, která udává střední hodnotu vzdáleností souřadnic jednotlivých bodů profilu zkoumaného povrchu od střední čáry. (4)

#### Průměrná kvadratická odchylka profilu $R_q$

Je kvadratickou analogií parametru drsnosti povrchu  $R_a$  a je definována implicitním vztahem: (9)

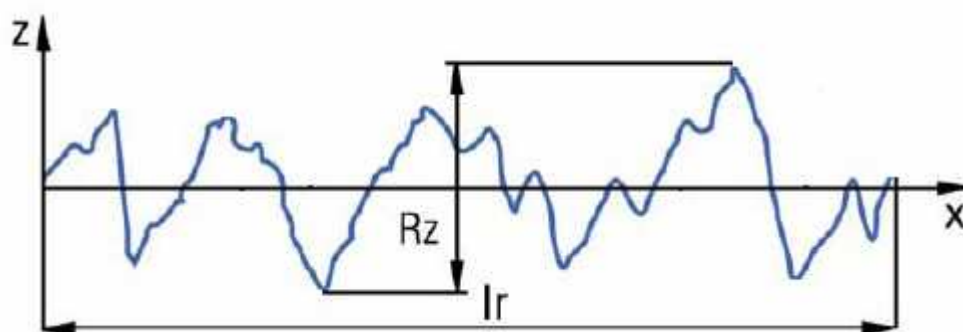
$$R_q = \sqrt{\frac{l}{l_r} \int_0^{l_r} Z^2(x) dx} \quad (3.2)$$

#### Největší výška nerovnosti profilu $R_z$

Jedná se o výškovou charakteristiku drsnosti povrchu. Je to vzdálenost mezi nejvyšším výstupkem profilu a největší prohlubní profilu v rozsahu základní délky viz obr. 3.6. Taktéž odráží časově-prostorový průběh nerovností povrchu. (9)

$$R_z = Z_p + Z_v, \quad (3.3)$$

Kde je:  $Z_p$  - výška největšího výstupku v rozsahu základní délky  $l_r$  [ $\mu\text{m}$ ],  
 $Z_v$  - hloubka nejhlubší prohlubně v rozsahu základní délky  $l_r$  [ $\mu\text{m}$ ].

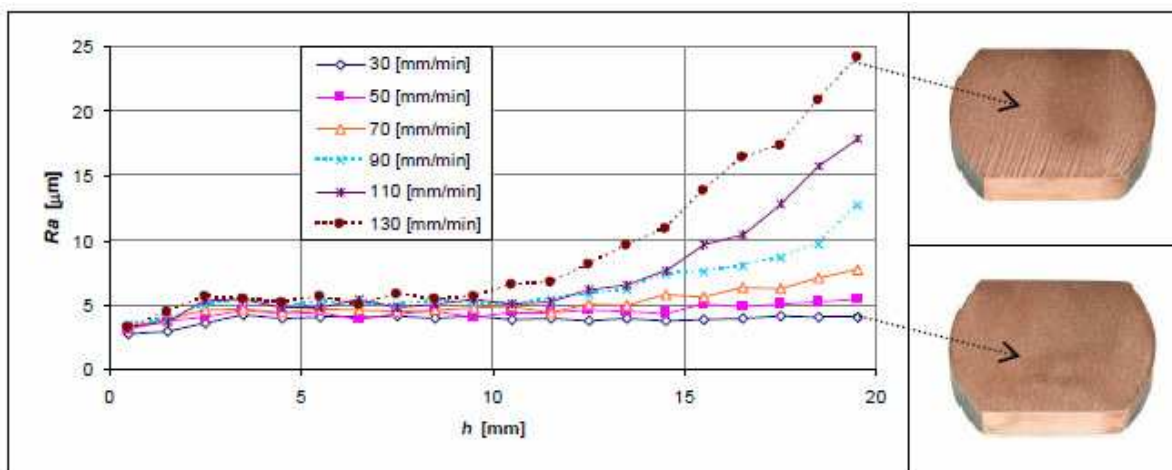


Obr.3.6 Největší výška nerovnosti  $R_z$  (4)

Drsnost povrchu je tedy dnes určována normou, která ale nevystihuje všechny důležité charakteristiky povrchu pro získání informací a jeho chování za provozu. Z hodnoty  $R_a$  nelze vyčíst jak výsledný povrch vytvořený určitou technologií vlastně vypadá. Je známo, že dva povrchy, které mají stejnou hodnotu  $R_a$ , mohou mít zcela rozdílné funkční vlastnosti. (4,9)

Pro příklad kvality drsnosti v závislosti na hloubce řezu je použito měření z literatury (18), které představuje výsledný graf této závislosti pro 6 různých

rychlostí posuvu řezné hlavy AWJ. Je zde znázorněno i kvalitativní porovnání mezi nejnižší a nejvyšší rychlostí řezné hlavy. Hodnoty uvedené v grafu byly dosaženy měřením na kontaktním profilometru Mitutoyo Surftest SJ401. Z grafu je také patrné, že chybí vývoj drsnosti v iniciační zóně. To je nejspíš způsobeno velkým odstupem od horního okraje vzorku při měření.



Obr.3.7. Graf závislosti drsnosti  $R_a$  na hloubce  $h$  pro hliník. (18)

Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší rychlostí posuvu řezné hlavy je markantní. Při posuvu řezné hlavy 30 [mm/min] můžeme vidět stabilní hodnoty drsnosti povrchu  $R_a$  i ve vyšších hloubkách řezu, zatím co při vyšších posuvech dochází k nárůstu této hodnoty. Proto je jasné, že rychlost posuvu řezné hlavy má zásadní vliv na kvalitu povrchu řezaného materiálu. V dalším textu bude podrobněji rozebrán průběh závislosti drsnosti povrchu  $R_a$  na hloubce řezu  $h$  pro nejnižší a nejvyšší rychlost posuvu řezné hlavy.

#### Pro $v_p = 30$ mm/min

Z grafu obr.3.7. lze vyčíst, že v hloubce 0,5 mm nabývá hodnota  $R_a$  3 μm a postupně se zvyšuje avšak velmi málo a osciluje až do maximální hodnoty hloubky řezu nepřekročí hodnotu 5 μm.

#### Pro $v_p = 130$ mm/min

Vývoj parametru  $R_a$  je obdobný jako u předchozí rychlosti posuvu avšak má o něco vyšší hodnoty a osciluje 5 – 6 μm. Zlom mezi těmito rychlostmi však přichází v hloubce řezu 9,5 mm, kde hodnoty  $R_a$  mají už pouze vzrůstající charakter.

Z výzkumu uvedeného v literatuře (9) jsou zhodnoceny parametry, které mají největší vliv na kvalitu obrobenej plochy a jsou to rychlost posuvu řezné hlavy, tlak kapaliny, hmotnostní tok abraziva, poměr průměru vodní a abrazivní trysky a hloubka řezu. Ze všech těchto parametrů je technologicky nejnáročnější regulování rychlosti posuvu řezné hlavy.

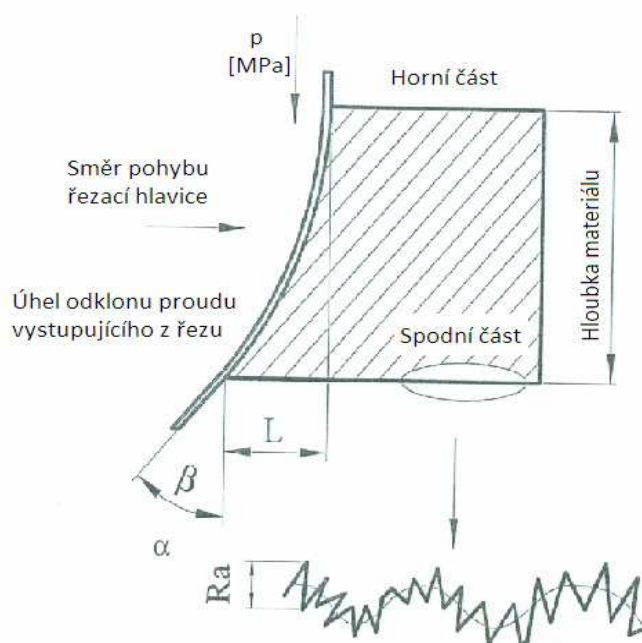
### 3.2.2. Odchylka kolmosti a deviace řezné stopy

Odchylkou kolmosti myslíme změny tvaru stěn obrobené plochy při dělení AWJ. Patří mezi základní makro-geometrické znaky obrobeného povrchu AWJ. Základní typy odchylek kolmosti jsou:

- Odchylka tvaru V – Řez je v horní části širší než v dolní. Tento stav vzniká v důsledku delšího působení proudu. Jedná se o nejčastější typ odchylky kolmosti.
- Obrácená (reverzní) odchylka – vzniká větším prořezáním dolní části oproti horní. Vzniká nejčastěji u měkkých materiálů.
- Soudková odchylka kolmosti – střed řezu je širší než v horních a dolních okrajových částech materiálu. Vzniká při obrábění velmi hrubých obrobků.
- Kosodelníková (lichoběžníková) odchylka kolmosti – jedná se v podstatě o V – odchylku, která je nakloněná z důvodu špatně nastaveného úhlu sklonu trysky k obrobku. (17)

Způsobů jakým se dají minimalizovat odchylky kolmosti je mnoho například nakloněním řezací hlavy, menším průměrem vodní dýzy, snížení rychlosti posuvu apod. (17)

V průběhu dělení AWJ dochází ke změně tvaru nástroje a to v důsledku zvyšování průměru a zpoždování původně kolmého proudu. Vstup paprsku do materiálu má jinou polohu než jeho výstup. Na toto zpoždění mají vliv mechanické vlastnosti materiálu, hloubka řezu a rychlost posuvu řezné hlavy. Toto zakřivení je vedeno v opačném směru než-li je směr řezu. Toto má vliv na zhoršení kvality povrchu tedy na drsnost povrchu a odchylku kolmosti řezné hrany. (5,17)



Obr. 3.8. Odchylka stopy v důsledku deviace proudu. (17)

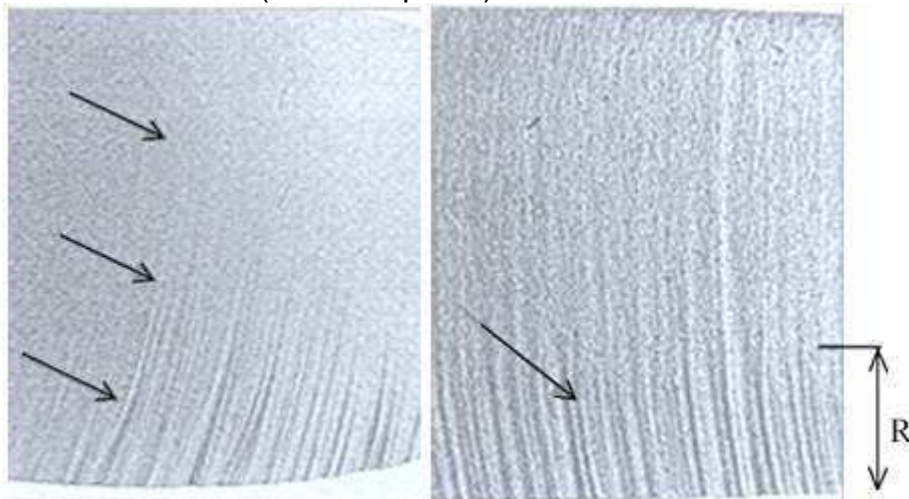
Rozdíl mezi vstupem a výstupem paprsku z obrobku je označen na Obr.3.8. jako úsek  $L$  a jeho velikost se pohybuje od desetin milimetru až po několik desítek milimetru.

Toto chování paprsku způsobuje celou řadu vad, které jsou popsány v literatuře (17) a jde především o:

- místní odchytku stopy řezu,
- nepravidelnou hloubku stopy řezu,
- neúplný konec řezu. (17)

Místní odchytky stop řezu – „Jedná se o nepravidelnosti deviace stopy řezu ve směru a nebo proti směru dělení.“ (5) Jsou zaznamenány dvě základní modifikace:

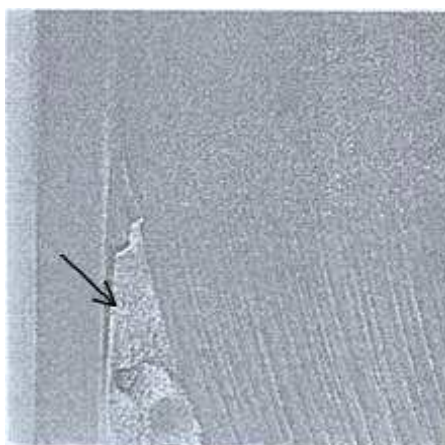
- Odchytky se projevují tak, že postupně narůstá ve směru hloubky řezaného materiálu (obr. 3.9. vlevo)
- Seskupení odchylek do nižší části řezu (oblast R) ve směru hloubky řezaného materiálu (obr.3.9. vpravo)



Obr.3.9. Modifikace odchytky stopy řezu. (17)

Nepravidelná hloubka stopy řezu – Je to nadměrná nerovnoměrnost hloubky stopy řezu vytvořené hydroabrazivním dělením materiálu. Jde o příliš hlubokou stopu řezu a nebo o vytváření dutin ve spodní části obráběné plochy. Obě tyto odchytky se na obrobené ploše vyskytují a nedá se posoudit, která z nich má převládající charakter.(17)

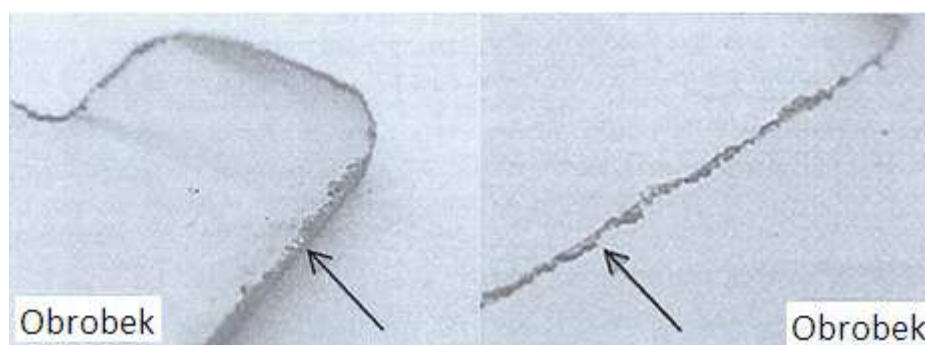
Neúplný konec řezu – V literatuře (5) je tento neúplný konec řezu též nazýván jako nedořezaný nos. Znamená to že nedošlo k prořezání celé hloubky materiálu. „Příčinou je překmit paprsku v důsledku tzv. tvarové paměti proudu. Nedořezaný trojúhelníkový útvar vznikne v okamžiku zastavení nebo výrazného snížení rychlosti posuvu, kdy proud s hmotnostním tokem abraziva stále proudí na horní koncovou část plochy materiálu a dolní část paprsku retardovaná o vzdálenost  $L$  přeskočí konečnou nedořezanou oblast.“(5)



Obr.3.10. Vznik nedořezaného nosu. (5)

### 3.3. Chyby topografie povrchu po dělení AWJ a kvalita řezné spáry

„Chyby na hranách řezné spáry vznikají v důsledku přílišné eroze materiálu v oblasti řezné spáry.“(5) Bezprostředně v místech výstupu vodního paprsku z řezu ve spodní hraně materiálu jsou viditelné zbytky plastického přetváření materiálu a v této oblasti dochází k prořezání zbylého materiálu. Na zbytku materiálu se tvoří otřepy, které se sklápějí směrem dolů. (17)

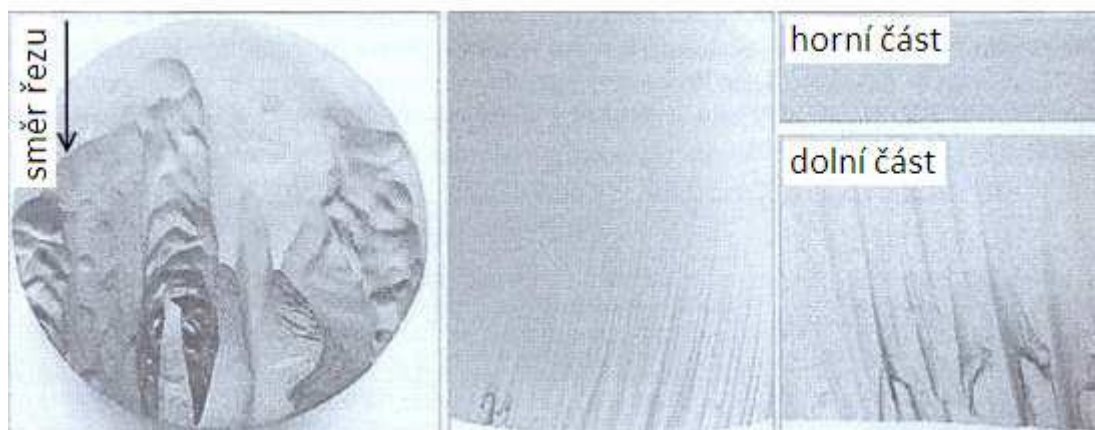


Obr.3.11. Zvednutá hrana po řezání AWJ (5)

Rozdíly v charakteru povrchu a tvaru otřepů jsou zde dané především vlastním materiálem, který je řezán a proto jsou dle (17) rozhodujícími parametry tvrdost a houževnatost řezaného materiálu.

Na následujícím Obr.3.12. je porovnání charakteru obrobených ploch. Jedná se o wolfram, nerezová ocel a dural. Jsou zde patrné povrchové chyby popsané v kapitole 3.2.2.

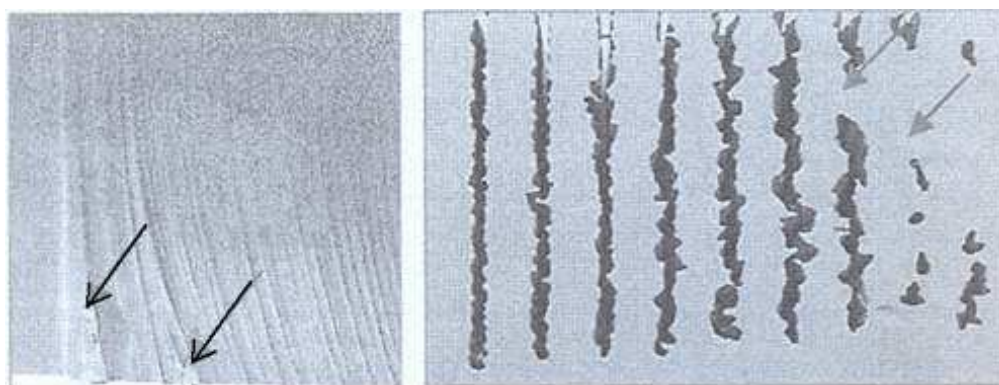




Obr. 3.12. Porovnání obrobených ploch. (17)

Neúplný řez – Je to další vada, která se vytváří v důsledku řezání AWJ. Tomuto jevu se dá předejít pomocí vhodně zvoleného hmotnostního toku abraziva a rychlosti posuvu. Podle (17) byly projevy neúplného řezu rozlišeny do dvou poloh:

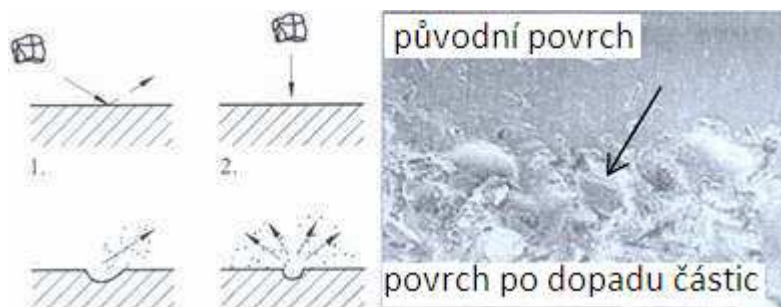
- V první dochází na obrobené ploše ke vzniku lokálních neporezaných oblastí materiálu. Ten vyčnívá z obrobené plochy a je sní pevně spojený viz obr 3.13.
- V druhém případě se neúplný řez projevuje v podobě souvislé nepřeřezané oblasti v celé délce a v dolní části obrobku. „Se vzrůstající hloubkou materiálu dochází k rozšiřování paprsku a tedy i ke zvětšení plochy, na kterou působí energie paprsku. Stejné množství energie na větší plochu způsobí pokles úběru materiálu, který se stupňuje až po kritickou hodnotu, kdy již daná energie nestačí na rozrušení materiálu v celém průřezu.“(5)



Obr.3.12. Obě polohy neúplného řezu. (17)

### 3.3.1. Povrchové kazy na materiálu

Plošné kazy – tyto kazy jsou rozptýlené po povrchu materiálu, často nemají ostré obrysy a prakticky mají neměřitelnou hloubku nebo výšku. Funkční povrch obrobku je těmito kazy nerovnoměrně narušen a může dojít i k jeho zvlnění. Je to způsobeno částicemi, které se oddělují od proudu kapaliny a jsou v relativním pohybu. Tyto částice poškozují povrch materiálu, který je většinou měkčí. Intenzita tohoto jevu je ovlivněná více faktory, které se vztahují k působícímu médiu, abrazivním částicím a exponovanému povrchu. (17)



Obr.3.13. schéma dopadu částic na povrch materiálu vlevo a Povrch s plošnými vadami vpravo. (5)

Mezi další povrchové kazy patří také koróze, která se dá popsat jako znehodnocení materiálu okolním v reakci s okolním prostředím. Po působení pracovního média (v tomto případě vody) dochází k oxidaci a to hlavně v místech, které přišly do kontaktu s řezným nástrojem. (5)

Odbarvení – „Narušením celistvého upraveného povrchu dochází ke vzniku lokálních ploch, které se vzhledem odlišují od okolního (původního povrchu).“ (17) Příčinou je povrchové poškození rozptylujícími se částicemi abraziva.

Šířka řezu – technologie řezání vodním paprskem se dělí na WJM nebo AWJ a v závislosti na typu použité trysky se šířka řezu mění. U WJM je šířka řezu v rozmezí 0,1 – 0,8 mm a u AWJ je to 0,8 – 2,2 mm. Použití kteréhokoliv z paprsků je závislé na typu a hloubce řezaného materiálu a na požadované kvalitě děleného povrchu. (17)

### 3.4. Trendy vedoucí k lepší kvalitě povrchu

U metody dělení materiálů hydroabrazivním paprskem jsou stejně jako v jiných oblastech průmyslu vyvíjeny snahy o zdokonalení výrobního procesu, efektivnosti a jeho výstupních charakteristik. To vše vede k dalším výzkumům vstupních parametrů a jejich závislostí, faktorů vstupujících do procesu dělení a také získávané geometrie řezných ploch a jejich topografie.

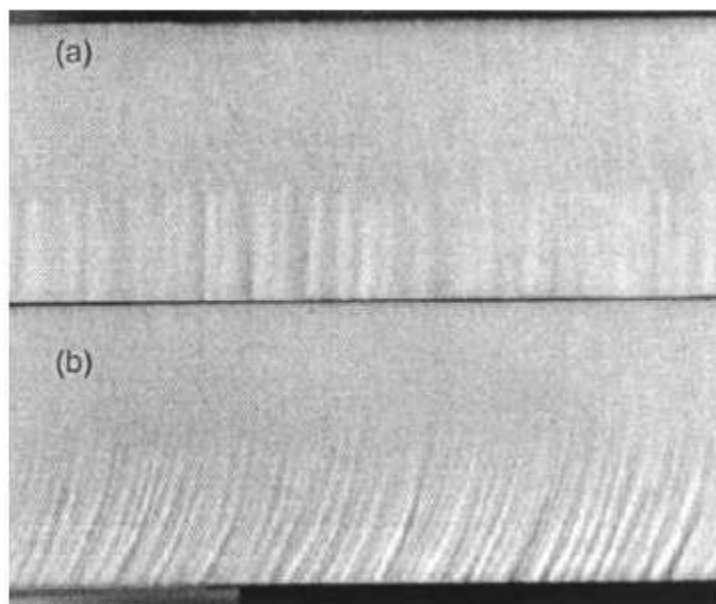
V dnešní době je geometrie do značné míry vyřešena, ale topografie plochy řezu je stále zkoumána. (4)

#### Oscilační řezání

Tato technika řezání byla vyvinuta v poslední dekádě 20. století za účelem zvýšení kvality řezaného povrchu obrobku. Oscilační řezání dokáže zvýšit hloubku hladké zóny  $h_c$  u keramických materiálů o více než 30%.



V případě měkkých ocelí o více než 40% za totožných vstupních podmínek jako u klasického hydroabrazivního dělení. (4,11,13)



Obr.3.7 Srovnání povrchů keramiky vytvořených AWJ

- a) s oscilační řeznou hlavou  
b) bez oscilační řezné hlavy (11)

Výsledky experimentální studie ukazují, že při použití oscilační řezné hlavy lze redukovat deviační úhel striací až k nulové hodnotě a to nakloněním hlavy mezi 15 až 20 stupni od svislé osy v rovině řezu. Zároveň díky tomu dochází i ke snížení frekvence výskytu striací což znamená částečné vyhlazení rýhované zóny ve spodní části řezu a také ke zlepšení drsnosti a vlnitosti.

Při postupném zvyšování frekvence řezné hlavy bylo zjištěno, že se zvětšuje hloubka hladké zóny, ale pouze do určité hodnoty, kde po překročení její velikost opět klesá. Dále bylo dokázáno, že při zvyšující se rychlosti posuvu je nutné zvyšovat i oscilační frekvenci. (4,11)

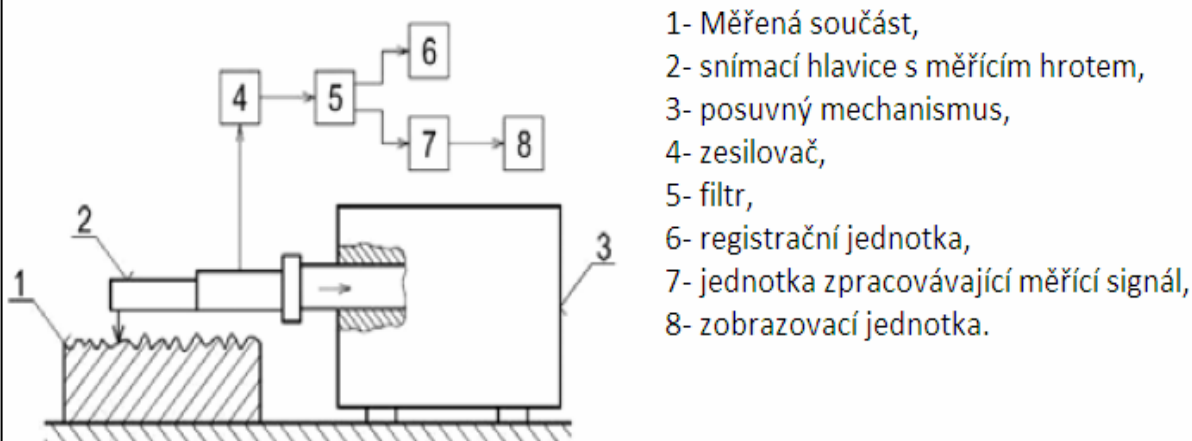
### 3.5. Metody hodnocení povrchu.

Kontrola jakosti povrchu představuje významnou součást přípravy povrchů u všech typů technologií, které se podílí na jejich vytváření a je důležitá z hlediska jejich funkčnosti a proto je řízena normami. V dnešní době lze hodnotit topografii povrchu různými metodami. Každá z nich má své výhody a nevýhody. Zjednodušeně lze rozdělit metody hodnocení topografie povrchu do třech základních skupin:

- metody mechanické,
- metody optické,
- jiné metody. (9)

### 3.5.1. Mechanická metoda

Mechanické metody, též nazývané jako dotykové metody patří v současnosti mezi nejrozšířenější metody, zejména ve strojírenské praxi. Dotykové měřicí přístroje umožňují přímé měření a použití pro téměř všechny typy povrchů. Hodnoty získané z měření touto metodou se používají jako srovnávací metody pro jiné metody měření. V důsledku tlaku na hrot snímače, který je vyroben z velmi tvrdého materiálu (např. Polykrystalický diamant) dochází k narušení povrchové vrstvy měřené součásti. Což může ovlivnit výsledek měření. Na Obr. je uvedeno schéma dotykového profilometru. (4,9)



Obr.3.8 Schéma principu kontaktního profilometru. (9)

Zhodnocení výhod a nevýhod mechanické metody měření topografie povrchu je uvedeno v Tab.3.1.

Tab.3.1 (9)

Výhody	Nevýhody
Přímé měření výškových nerovností povrchu vůči referenční rovině,	Poškození povrchů u měkkých materiálů,
na předpokladu použití této metody k měření je definována standardizace parametrů topografie povrchu,	neumožňuje kontinuální kontrolu a řízení kvality povrchu,
na předpokladu použití této metody k měření je definována standardizace parametrů topografie povrchu,	relativně pomalý pohyb hrotu po měřeném povrchu,
možnost měření v nečistém prostředí.	pouze 2D měření (3D měření je časově velmi náročné).
vysoký měřicí rozsah ve směru kolmém na střední rovinu povrchu,	měření nemůže být řízeno na dálku,

### 3.5.2. Optické metody

Jedná se o bezdotykové měření, kde je snímací hrot nahrazen paprskem elektromagnetického záření, což vylučuje poškození povrchu měřené součásti. Jsou alternativou za dotykové profilometry. Světelný svazek, který nahrazuje hrot dopadá na povrch měřeného materiálu odkud se buď odrazí nebo rozptýlí. Může to být i kombinace odrazu s rozptylem. Vzájemná interakce mezi paprskem a povrchem měřeného vzorku závisí na především na užití vlnové délce zařízení a na drsnosti povrchu. Hlavní nevýhodou optických metod je, že se jedná o měření nepřímé. Tudíž získaná data je nezbytné porovnat s daty získanými kontaktním profilometrem. Většina bezdotykových metod je vhodná k měření malých nerovností povrchů (menší než 1  $\mu\text{m}$ ). U kovových materiálů dělených metodou AWJ je drsnost povrchu od 1  $\mu\text{m}$  až do 10  $\mu\text{m}$  i více. Výhody a nevýhody optických metod jsou sepsány v tab. (4,9)

Tab 3.2 (9)

Výhody	Nevýhody
Bezkontaktnost a nedestruktivnost,	Měření parametrů topografie povrchu je nepřímé,
schopnost kontinuální kontroly a řízení kvality povrchu,	ztížená korelace na normované parametry,
opakovatelnost měření,	složitější způsob interpretace výsledků.
možnost měření z větší vzdálenosti.	

### 3.5.3 Ostatní metody

Do této skupiny měření charakteristik topografie povrchu můžeme zařadit celou řadu metod, které nepracují na mechanickém nebo optickém principu. Mezi ně patří:

- SEM ( scanning elektron microscopy) – analyzuje proud elektronů odražených povrchem zkoušeného materiálu a kalibrací na parametry topografie povrchu,
- RTG difrakční metoda – využívá strukturních vlastností materiálu po působení rentgenova záření, kde je vlnová délka přibližně stejná jako meziatomová vzdálenost v krystalové mřížce,
- elektronová difrakce – zjišťuje strukturu povrchu u kovových materiálů,
- AFM (atomic force microscopy) – využívá miniaturního a velmi ostrého hrotu proti němu působí meziatomární síly měřeného materiálu a vlivem nerovností je hrot vychylován a jeho pohyb zaznamenáván,
- a další.

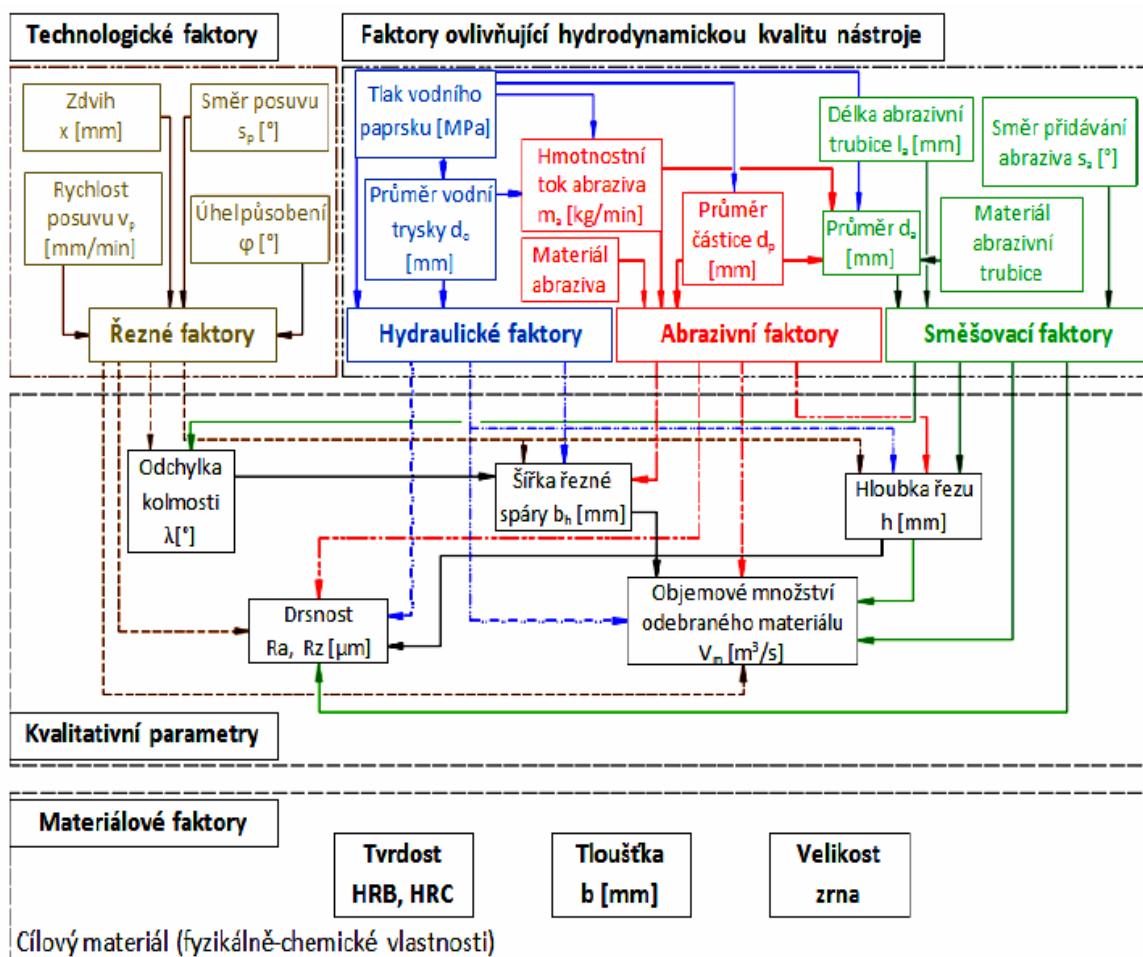
Výsledky těchto metod se vzájemně doplňují a tudíž se uvedené metody často aplikují společně.(4,9)

## 4. TECHNOLOGICKÉ FAKTORY

Jak je popsáno v kapitole 2.4.2. vysokotlaký hydroabrazivní paprsek vytváří na povrchu obroku reliéf vyznačený dvěma zřetelně rozeznatelnými zónami (horní hladkou a dolní rýhovanou). Právě poměr velikostí těchto zón je závislý na faktorech, které vstupují do procesu řezání hydroabrazivním paprskem. Tyto faktory neovlivňují pouze výslednou kvalitu povrchu děleného materiálu, ale i celkovou efektivitu obrábění hydroabrazivním paprskem.

Do procesu dělení materiálů hydroabrazivním paprskem vstupuje velké množství různých faktorů, které ovlivňují kvalitu obrobené plochy. Obecně se rozdělují do dvou, a to do skupin přímých a nepřímých procesních faktorů.

U jednotlivých faktorů dochází k vzájemné interakci a ke změnám účinků v závislosti na hloubce řezu a dalších parametrech. Na obr. je znázorněno vzájemné působení jednotlivých faktorů na kvalitu obrobené plochy. (1,4,9)



Obr. 4.1 Schéma znázornění vzájemného působení faktorů na výslednou kvalitu obrobené plochy (4)

Prostřednictvím přímých faktorů se vytváří počáteční nástroj tedy hydroabrazivní paprsek. Patří mezi ně:

Tab.4.1 (9)

Faktory	Druh	Označení	Jednotka
Faktory dělení	Rychlost posuvu	$v_p$	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$
	Směr posuvu	$s_p$	$[\circ]$
	Počet přechodů	$n_p$	$[l]$
	Zdvih	$x_z$	$[\text{mm}]$
	Úhel působení	$\phi_p$	$[\circ]$
	Tloušťka materiálu	$b$	$[\text{mm}]$

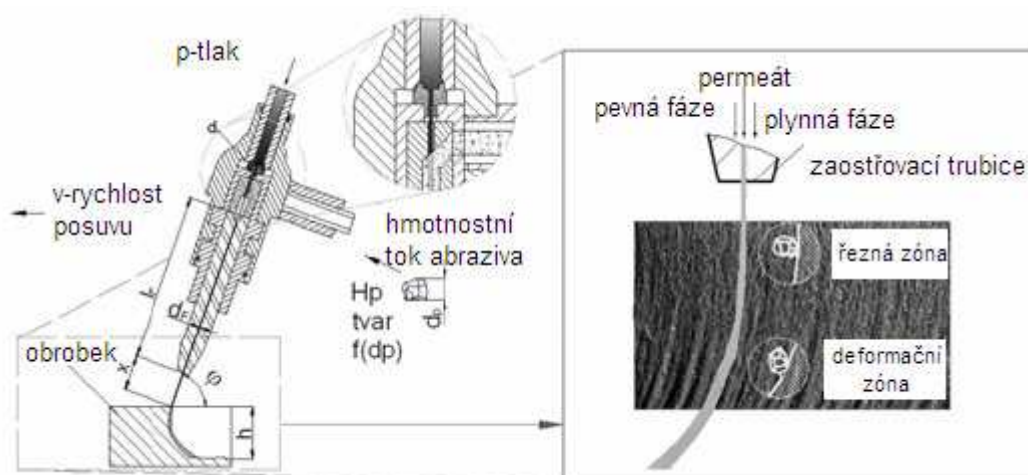
Mezi nepřímé faktory, které ovlivňují kvalitu počátečního nástroje patří:

- hydraulické faktory,
- směšovací faktory,
- abrazivní faktor. (5)

Tab.4.2 (9)

Faktory	Druh	Označení	Jednotka
Hydraulické	Tlak čerpadla	$p_p$	$[\text{Pa}]$
	Tlak kapaliny	$p$	$[\text{Pa}]$
	Průměr vodní trysky	$d_0$	$[\text{mm}]$
Směšovací	Průměr zaostřovací trubice	$d_a$	$[\text{mm}]$
	Délka zaostřovací trubice	$l_a$	$[\text{mm}]$
	Přívod abraziva		
Abrazivní	Hmotností tok	$m_a$	$[\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}]$
	Průměr částice	$d_p$	$[\text{mm}]$
	Tvar abraziva		
	Tvrdost abraziva	$H_a$	$[\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}]$

Tyto faktory ovlivňují především kvalitu a energetickou účinnost výchozího nástroje. Pomocí těchto faktorů vystupuje hydroabrazivní paprsek do procesu vlastního úběru materiálu.(9)



Obr.4.2. Vliv faktorů na proces řezání materiálu (15)

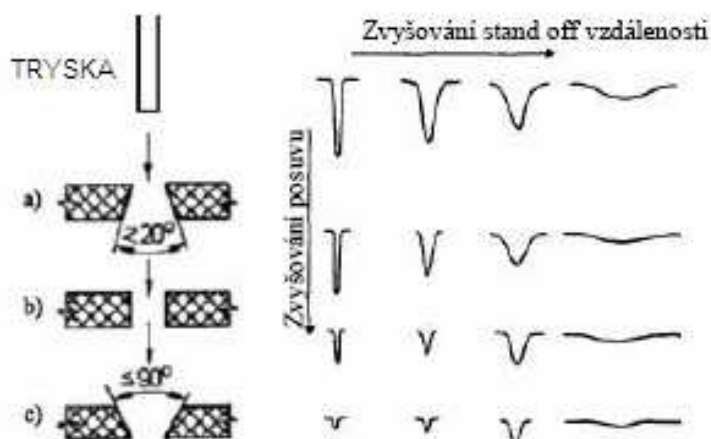
Pracovní povrch proudu se skládá z kapalně, pevné a plynné fáze. Pevnou fázi proudu tvoří abrazivní částice, které vysokou rychlostí dopadají na horní erozní část řezaného materiálu (řezná zóna), přitom dolní erozní část podléhá plastickým deformacím (deformační zóna) viz obr. 4.2 (9,15)

Na základě faktorové analýzy patří mezi nejdůležitější parametry, které mají největší vliv na topografii povrchu dělených stěn jsou posunová rychlost řezné hlavy, hloubka řezu, druh abrazivního materiálu jeho zrnitost a hmotnostní tok, tlak pracovní kapaliny a také poměr průměrů vodní trysky a směšovací trubice. (4,9)

#### 4.1. Přímé faktory dělení

##### Vzdálenost trysky od obrobku

Pokud se vzdálenost mezi tryskou a obrobkem zvětšuje, klesá úběr materiálu a zvětšuje se šířka řezné spáry. Zároveň se zhoršuje jakost obrobeného povrchu a geometrie řezu. (1,5)

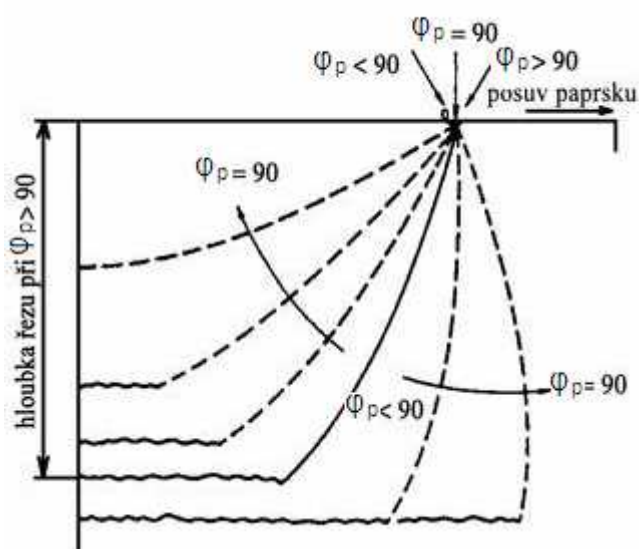


Obr.4.3 Schéma řezu a tvaru řezné spáry (1)

Paprsek, který proniká materiálem ztrácí svou kinetickou energii, a proto vnější okraj paprsku nemá tak výrazný řezný efekt ve spodní části obrobku jako v horní. S tím souvisí zvětšování kuželovitosti řezné spáry při zvětšující se vzdálenosti trysky od řezaného materiálu. (5)

#### Úhel působení

Řezný proces je ustálený do určité hloubky  $h_c$ . Aby se zamezilo možnosti vzniku nedořezání materiálu musí být hloubka  $h_c$  větší než je tloušťka řezaného materiálu a toho lze dosáhnout vhodným sklonem paprsku  $\varphi_p$ , který je označován jako úhel řezání. Tento úhel je při hydroabrazivním obrábění mezi paprskem a rovinou obrobku. (5)



Obr 4.4 Možné způsoby změny úhlu řezání (5)

#### Rychlost posuvu

Změnou rychlosti posuvu se ovlivní řaděvším tyto vlastnosti řezné spáry:

- hloubka řezu,
- tvar řezné spáry,
- šířka řezné spáry,
- kvalita povrchu řezné spáry. (5,9)

Závislost rychlosti posuvu na tvaru a kuželovitosti řezné spáry je již popsána v kapitole 2.4.2. *Interakce s materiálem*.

Kuželovitost nebo-li podřezání nebo nedořezání řezné hrany můžeme předejít několika způsoby:

- oscilační řezání,
- včasná změna úhlu dopadu paprsku,
- volba optimální vzdálenosti trysky od obrobku,
- volba optimální posunové rychlosti,
- volbou vhodného množství abraziva. (5)

## 4.2. Hydraulické faktory

### Tlak kapaliny $p$

Pracovní tlak kapaliny volíme v závislosti na typu řezaného materiálu, tedy se zvyšující se tvrdostí materiálů volíme vyšší tlak kapaliny. V současnosti multiplikátorová čerpadla dosahují tlaku až 700 MPa.

Tlak paprsku určuje kinetickou energii částicím pohybujícím se ve vodním paprsku. Při vyšších tlacích je vyšší kinetická energie molekul vody a jednodušeji porušuje vazby v materiálu obrobku. (4,5,9)

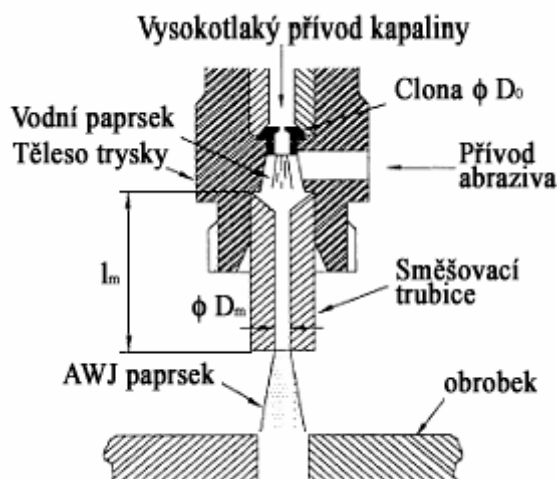
### Průměr vodní trysky

Vodní tryska vytváří vysokorychlostní paprsek z vysokotlaké vody. Tryska má vliv na výsledný tvar paprsku, ale i na jeho řeznou sílu, účinnost, výkon, šířku řezné spáry a na výslednou kvalitu řezného procesu. Se zvětšujícím se průměrem trysky roste i roste i hloubka řezu (při jinak stejných podmínkách). S průměrem trysky souvisí i další parametry jako vzdálenost od obráběného povrchu, množství dodávané vody i abraziva, ovlivňuje maximální řeznou rychlost a další. Nevhodně zvolené řezné podmínky mohou mít výrazný vliv na opotřebení trysek. (5)

## 4.3. Směšovací faktory

### Průměr a délka zaostřovací trubice

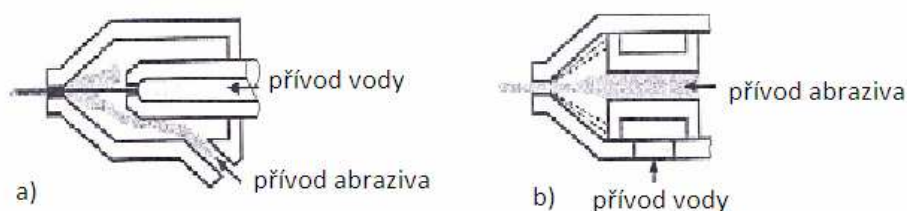
Průměr  $D_m$  a délka  $l_m$  zaostřovací trubice mají vliv na maximální řeznou rychlost a účinnost procesu.



Obr.4.5 Schéma abrazivní trysky (5)

K hydroabrazivnímu řezání využíváme dvou druhů trysek s rozdílnými typy přívodu abraziva. V souvislosti s konstrukcí trysky preferujeme dvě hlavní technologie přívodu abraziva. (5)





Obr.4.6 Abrazivní tryska s přívodem abraziva radiálním (a), axiálním (b) (1)

Pro hydroabrazivní řezný proces je výhodnější typ trysky s axiálním přívodem abraziva, který je složitější. V této trysce je lepší směšovací proces abraziva s vodou a snižuje se opotřebení obvodu trysky, protože abrazivum je do směšovací komory strháváno pod tlakem v důsledku proudící vody. (1,5)

### 4.3. Abrazivní faktory

#### Hmotnostní tok

Hmotnostní tok v závislosti na druhu použitého abraziva přímo ovlivňuje rychlost úběru materiálu a kvalitu řezné spáry. Množství abraziva je zpravidla odvozeno od množství vody a průměru trysky  $D_m$ . Pro dané množství abraziva  $m_a$  při rostoucí rychlosti průtoku vody klesá intenzita zvyšování hloubky řezu. Při hydroabrazivním řezání obecně platí, že se vždy používá největší velikost průměru vodní trysky v závislosti na výkonu čerpadla. Závislost hloubky řezu na hmotnostním toku je téměř lineární, ale tato linearita končí při vyšším  $m_a$ . (5,9)

#### Průměr a tvar abrazivních částic

Čím jsou abrazivní zrna menší, tím je dosahováno menších hloubek řezání, ale dosáhne se tím hladšího řezu. Právě zrnitostí lze ovlivnit kvalitu a drsnost povrchu materiálu. Použití abraziva s vyšší zrnitostí snižuje řezný účinek (úběr materiálu). (5,9)

#### Tvrdost abraziva

Jak už bylo uvedeno v kapitole 2.3.7 *Abrazivo* tvrdost abraziva je dána jeho chemickým složením a mechanicko-fyzikálními vlastnostmi. Používají se především abraziva na bázi křemičitanů a polodrahokamů (granát, olivín). Křemičité písky jsou výhodnější z hlediska lepší výsledné drsnosti povrchu. Tvrdší abraziva jsou vhodná k použití při rychlejšímu řezání, pokud je požadován větší úběr materiálu. (1,3,5)

## Závěr

V první části této bakalářské práce je provedeno základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění. Dále se práce zabývá už pouze nekonvenční technologií řezání vodním paprskem a vodním paprskem s příměsí abraziva. Je zde podrobně rozepsáno formování řezného nástroje AWJ a jeho působení.

Hlavním cílem práce bylo zkoumání integrity povrchu obrobeného AWJ technologií. Na jakost obrobeného povrchu jsou kladeny vysoké požadavky avšak zatím stále chybí normy, které by jakost jednoznačně definovaly. V práci jsou uvedeny všeobecně užívané stupně kvality Q1 až Q5 avšak každá firma si tyto stupně kvality určuje sama a tudíž požadovaná kvalita musí být s výrobcem přímo konzultována. Dále jsou rozebrány parametry drsnosti povrchu a na vybraném grafu použitým z měření, které je uvedeno v literatuře (18) je uveden příklad kvality drsnosti povrchu na hloubce řezu, za rozdílných posuvů řezné hlavy. Tento graf sloužil jako důkaz, že posuv řezné hlavy má zásadní vliv na kvalitu povrchu i při nižších posunových rychlostech. U grafu je uveden rozbor kvality povrchu pro nejnižší a nejvyšší posunovou rychlost a je patrná rozdílnost v hodnotách drsnosti povrchu se vzrůstající hloubkou řezu. Jak popisuje výzkum v literatuře (9) mezi parametry, které mají zásadní vliv na jakost obrobeného povrchu jsou rychlost právě posuvu řezné hlavy, tlak kapaliny, hmotnostní tok abraziva, poměr průměru vodní a abrazivní trysky a hloubka řezu. Avšak právě z těchto parametrů je technologicky nesnadnější regulování rychlosti posuvu řezné hlavy. Z hlavních geometrických parametrů dělící stěny je zde popsána deviace řezné stopy paprsku, která se projevuje rozdílnou polohou vstupu a výstupu paprsku z řezaného materiálu. To způsobuje celou řadu vad z nich ty hlavní jsou popsány v textu. Dále se práce věnuje chybám topografie povrchu, které jsou zobrazeny na obrázcích a jsou zde také popsány jednotlivé povrchové kazy na materiálu. Závěrem této oblasti jsou popsány způsoby měření topografie povrchu.

Poslední částí se práce zabývá faktory, které vstupují do řezného procesu. Tyto faktory neovlivňují pouze výslednou kvalitu řezaného materiálu, ale i celkovou efektivitu obrábění AWJ. Faktory se dělí na přímé a nepřímé z nichž ty nejzásadnější již byly výše popsány.

Poznatky z této práce budou použity k dalšímu studiu a popřípadě porovnány se skutečným měřením a případném srovnání technologie AWJ s jinými nekonvenčními technologiemi.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice : Technická univerzita Košice, Strojnícka fakulta – edícia vedeckej a odborného literatúry, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
2. DVOŘÁKOVÁ, J., DVOŘÁK, J. Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem. *Glassrevue.com*, Vol.2007, No.21, ISSN 1802-8497, [online]. [cit. 23. března 2010]. Dostupný na World Wide Web: <<http://www.glassrevue.com/>>.
3. DVOŘÁKOVÁ, J., DVOŘÁK, J. Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem II. *Glassrevue.com*, Vol.2008, No.15, ISSN 1802-8497, [online]. [cit. 5. dubna 2010]. dostupný na World Wide Web: <<http://www.glassrevue.com/>>.
4. PECHÁČEK, Martin. *Hodnocení kvality povrchu při řezání u technologie AWJ a WJM*: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 88 s., 2 přílohy. Vedoucí práce Ing. Martin Slaný.
5. DVORÁK, J.: *Integrita rozhraní materiálu obráběných progresivními technologiemi*. Disertační práce. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. Počet stran 109, počet příloh 3. Vedoucí práce doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
6. CHPS.cz: Vodní paprsek [online]. Chomutov: [cit. 26. září 2010]. Dostupné z WWW: <<http://www.chps.cz/>>.
7. PTV.cz: Produkty [online]. [cit. 29. září 2010]. Dostupné z WWW: <<http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/index.html>>
8. HUMÁR, A. *Technologie I: : Technologie obrábění - 3. část*. [online]. [cit. 2009-05-02]. 57 s. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné také z WWW:<<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>>
9. VALÍČEK, J. *Měření a řízení jakosti povrchu při hydroabrazivním dělení materiálu*. Habilitační práce. Ostrava: VŠB-TUO, 2008.
10. OSMAN, A. H., et al. experimental analysis of high-speed air-water jet flow in an abrasive water jet mixing tube. *Flow measurement and instrumentation*. March 2004, Volume 15, Issue 1, s. 37-48. Dostupné z WWW:<<http://www.sciencedirect.com>>.
11. CHEN, F. L.; SIORES, E. The effect of cutting jet variation on striation formation in abrasive water jet cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. August 2001, Volume 41, Issue 10, s. 1479-1486. Dostupný také z WWW:<<http://www.sciencedirect.com>>.
12. HASCALIK, Ahmet; CAYDAS, Ulas; GÜRÜN, Hakan. Effect of traverse speed on abrasive waterjet machining of Ti-6Al-4V alloy. *Materials & Design*. 2007, volume 28, Issue 6, s. 1953-1957. Dostupný také z WWW:<<http://www.sciencedirect.com>>.
13. SIORES, E., et al. Enhancing Abrasive Waterjet Cutting of Ceramics by Head Oscillation Techniques. *CIRP Annals : Manufacturing Technology*. 1996, volume 45, Issue 1, s. 327-330. Dostupný také z WWW:<<http://www.sciencedirect.com>>.

14. VALÍČEK, J., Vyhodnocování povrchů vytvořených vodním paprskem. *Mmspektrum*. [online]. [cit. 4.říjen 2010]. Dostupný také z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyhodnocovani-povrchu-vytvorenych-vodnim-paprskem>.
15. HLOCH, S; VALÍČEK, J., Technologické faktory vysokorychlostního hydroabrazivního paprsku a jejich vliv na povrch finálního výrobku. 2002, s. 21-24 Dostupný také z WWW: <http://www.web.tuke.sk/fvtpo/casopis/pdf07/1-str-21-23.pdf>.
16. VALÍČEK, J; HLOCH, S. Aplikace bezkontaktní optické metodiky měření a interpretace získaných výsledků. *Metal*. 2007, s. 5. Dostupné z WWW: <http://www.nanocon.cz/data/metal2007/sbornik/Lists/Papers/181.pdf>
17. ONDREJ, Híreš; MICHAL, Hatala; SERGEJ, Hloch. *Dělenie kovových materiálů okružnou pilou, vodným proudem a plazmovým oblúkom*. 1. vyd. Ostrava, 2007. 147 s.
18. *Vodní paprsek 2009*. Ostrava : Ústav geoniky AV ČR, 2009 , 2009. 29 s.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

WJM	water jet machining-hydrodynamické obrábění
AWJ	abrasive water jet-hydroabrazivní obrábění
USM	Ultrasonic Machining – obrábění ultrazvukem
ECM	Electrochemical Machining – elektrochemické obrábění
EBM	Electron Beam Machining – obrábění elektronovým paprskem
EDM	Electro Discharge Machining – elektroerozivní obrábění
ECG	Electro Chemical Grinding – elektrochemické broušení
CM	Chemical Machining – chemické obrábění
PCM	PhotoChemical Machining – fotochemické obrábění
LBM	Laser Beam Machining – rezání laserem
PAM	Plasma Arc Machining – obrábění plazmovým paprskem

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
$C_k$	[1]	koeficient charakteristické rychlosti
$b$	[mm]	tloušťka materiálu
$D$	[°]	deviační úhel
$d$	[mm]	průměr zaostřovací trubice
$H_a$	[N·mm <sup>-2</sup> ]	tvrdost abraziva
$h$	[mm]	celková délka dělicího řezu
$h_c$	[mm]	délka hladké zóny
$h_d$	[mm]	délka rýhované zóny
$l_r$	[m]	měřená délka
$m_a$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	hmotnostní tok abraziva
$n_p$		počet přechodů
$P$	[Pa]	tlak kapaliny
$\rho_p$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota abrazivního materiálu
$s_p$	[°]	směr posuvu
$R_a$	[μm]	průměrná aritmetická odchylka drsnosti
$R_q$	[μm]	průměrná kvadratická odchylka drsnosti
$R_z$	[μm]	největší výška nerovnosti
$v_a$	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost pohybu abrazivních částic
$v_e$	[m·s <sup>-1</sup> ]	kritická rychlost abrazivních částic
$v_p$	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost posuvu řezné hlavy
$Y_{ret}$	[mm]	retardace paprsku
$Z(x)$		funkce popisující profil
$Z_p$	[μm]	výška největšího výstupku v rozsahu základní délky $l_r$
$Z_v$	[μm]	výška největší prohlubně výstupku v rozsahu základní délky $l_r$
$\phi$	[°]	úhel působení
$v_p$	[mm/min]	rychlost posuvu řezné hlavy

